Universitatea de Stiinta si Tehnologie
POLITEHNICA din Bucuresti

ȘCOALA DOCTORALĂ DE TRANSPORTURI

Domeniul Studiilor Universitare de Doctorat

INGINERIA TRANSPORTURILOR

Rezumatul tezei(RO)

Proiectarea unui sistem multimodal de transport public urban pentru creșterea rezilienței serviciilor

Doctorand **Conducător**

Roozbeh Ebrahimi Golshanabadi **Mihaela Popa, Prof.dr.ing**

București, anul 2026

Capitolul 1 al tezei stabilește fundamentul conceptual, metodologic și empiric pentru investigarea rezilienței în sistemele de metrou urban, cu accent deosebit pe integrarea multimodală și managementul perturbărilor. Capitolul începe prin poziționarea transportului public ca o componentă critică a sistemelor de mobilitate urbană, subliniind nivelul ridicat de utilizare zilnică și expunerea sistemică la perturbări generate atât de factori interni (de exemplu, defecțiuni ale echipamentelor, îmbătrânirea infrastructurii), cât și de condiții externe (de exemplu, condiții meteorologice, incidente cu pasageri). Aceste perturbări sunt clasificate în întârzieri minore, perturbări cu evoluție lentă și incidente majore care conduc la suspendarea parțială sau completă a serviciului. Analiza evidențiază faptul că astfel de evenimente generează efecte în cascadă, inclusiv creșterea timpului de călătorie, scăderea fiabilității serviciului, pierderi economice și probleme de siguranță, ceea ce justifică necesitatea unui cadru analitic riguros pentru înțelegerea atât a dinamicii degradării, cât și a celei de recuperare în sistemele de transport. Capitolul introduce, de asemenea, conceptele duale de vulnerabilitate și reziliență, unde vulnerabilitatea caracterizează expunerea sistemului la perturbări, în timp ce reziliența reflectă capacitatea sistemului de a absorbi șocuri și de a restabili funcționalitatea într-un orizont temporal definit.

Pe baza acestui context, capitolul identifică limitări critice în literatura de specialitate existentă. O problemă centrală constă în focalizarea predominantă asupra analizei unimodale, în special asupra sistemelor de tip metrou, care neglijează interdependențele inerente rețelelor de transport multimodal. În plus, răspunsurile comportamentale ale pasagerilor la perturbări sunt adesea simplificate, ceea ce reduce realismul evaluărilor de reziliență. Analiza subliniază faptul că creșterea urbană contemporană intensifică aceste provocări, întrucât extinderea infrastructurii rămâne în urmă față de cerere, fiind necesare soluții interimare, precum conectivitatea bazată pe autobuze, pentru a completa sistemele de metrou. Acest context motivează integrarea unor abordări de planificare multimodală, în special în scenarii de perturbare, în care răspunsurile coordonate devin esențiale pentru menținerea accesibilității și a continuității serviciului.

Lacuna de cercetare este apoi articulată în mod sistematic atât printr-o discuție narativă, cât și printr-o sinteză structurată prezentată în Tabelul 1. Acest tabel clasifică lacunele pe mai multe dimensiuni, inclusiv fazele rezilienței sistemului, perspectiva asupra rețelei, măsurarea performanței, acoperirea geografică, practicile operaționale, proiectarea scenariilor, disponibilitatea datelor și aria comparativă.

Din perspectivă analitică, tabelul relevă faptul că studiile existente abordează insuficient procesele de recuperare post-perturbare, se bazează în mare măsură pe indicatori de cost și întârziere, în detrimentul unor indicatori specifici de reziliență, și prezintă o orientare geografică predominantă către megacitățile asiatice, cu o atenție limitată acordată contextelor europene, precum Bucharest. În plus, practicile operaționale, cum ar fi înlocuirea serviciilor de metrou cu transport de tip autobuz (bus bridging), sunt în mare parte euristice, mai degrabă decât optimizate în mod sistematic, iar lipsa unor date operaționale de înaltă rezoluție (de exemplu, seturi de date AVL/APC) limitează validarea empirică. Astfel, tabelul funcționează ca o hartă conceptuală care justifică teza prin corelarea deficiențelor identificate cu nevoi

specifice de cercetare, în special integrarea dinamicilor multimodale și a indicatorilor orientați spre reziliență.

Tabelul 1: Lacune de cercetare categorisite

Categoria lacunei (context)	**Subiect**	**Descrierea lacunei**
Fazele rezilienței sistemului	Recuperare și adaptare post-perturbare	Cercetare insuficientă privind procesele de recuperare și adaptare după perturbări majore
Perspectiva asupra rețelei	Analiza multimodală versus analiza unimodală	Literatura analizează predominant modurile de transport în mod izolat, în pofida dependenței rezilienței de interacțiunile multimodale
Măsurarea performanței	Indicatori de reziliență	Performanța este evaluată în principal prin costuri și întârzieri, mai degrabă decât prin indicatori de reziliență
Context geografic	Acoperirea regională a studiilor	Cercetarea este concentrată în megacitățile asiatice; există o lipsă de studii în regiunile europene și în cele în curs de dezvoltare
Practici operaționale	Strategii de intervenție pentru gestionarea perturbărilor (bridging)	Operațiunile de tip „bridging” sunt reactive și bazate pe experiență, nefiind proiectate în mod sistematic
Proiectarea scenariilor	Acoperirea severității perturbărilor	Focalizarea pe scenarii de tip worst-case omite perturbările de intensitate redusă care afectează continuitatea serviciului
Disponibilitatea datelor	Seturi de date operaționale	Jurnalele fragmentare și lipsa datelor AVL/APC de înaltă frecvență limitează procesul de calibrare
Aria comparativă	Compararea structurii rețelei	Analiza este limitată la o singură structură de rețea de transport

Ca răspuns la aceste lacune, capitolul formulează un obiectiv de cercetare clar: cuantificarea rezilienței sistemelor de metrou în condiții de perturbare prin integrare multimodală, cu un accent specific pe strategiile de tip „bus bridging”. Acest obiectiv este operaționalizat printr-un set de întrebări de cercetare care structurează progresiv investigația. Aceste întrebări vizează eficacitatea intervențiilor de tip „bus bridging” în creșterea rezilienței, dezvoltarea unor metrici cantitative de reziliență bazate pe indicatori operaționali, identificarea pragurilor critice care separă stările reziliente de cele nereziliente ale sistemului, influența configurațiilor de „bridging” asupra traiectoriilor de recuperare, precum și rolul operațiunilor multimodale coordonate în atenuarea efectelor în cascadă. Din punct de vedere conceptual, aceste întrebări reflectă o tranziție de la analiza descriptivă către modelarea predictivă și evaluativă a comportamentului sistemului în condiții de perturbare, punând accent atât pe degradarea performanței, cât și pe mecanismele de recuperare.

Capitolul prezintă apoi contribuțiile principale ale tezei, care sunt de natură metodologică, analitică și aplicativă. Din punct de vedere metodologic, lucrarea propune un cadru cantitativ care integrează analiza rețelelor bazată pe teoria grafurilor cu indicatori de performanță operațională pentru evaluarea rezilienței. Din punct de vedere analitic, aceasta introduce o caracterizare empirică a tiparelor de perturbare, bazată pe date privind incidentele colectate pe mai mulți ani, permițând identificarea modurilor recurente de defectare și a variațiilor temporale ale performanței sistemului. Cercetarea contribuie, de asemenea, prin evaluarea rezilienței la diferite scări spațiale și temporale, inclusiv la nivelul liniilor, stațiilor și al perioadelor de vârf și în afara orelor de vârf, evidențiind astfel heterogenitatea comportamentului sistemului. O inovație semnificativă constă în extinderea analizei rezilienței dincolo de abordările centrate exclusiv pe metrou, prin integrarea structurilor multimodale, în special a rolului conectivității intermodale și al redundanței.

Capitolul 2 dezvoltă fundamentul teoretic și metodologic pentru analiza rezilienței în sistemele de transport public, prin sintetizarea literaturii existente privind fiabilitatea, variabilitatea, modelarea perturbărilor și cuantificarea rezilienței. Capitolul începe prin poziționarea rezilienței în cadrul conceptului mai larg de calitate a serviciului, subliniind că măsurile tradiționale de fiabilitate, precum punctualitatea și regularitatea intervalelor de succedare (headway), nu reprezintă indicatori direcți ai rezilienței, ci repere de performanță de bază față de care poate fi evaluat comportamentul sistemului în condiții de perturbare. În acest context, punctualitatea este definită ca gradul de aliniere dintre orele programate și cele efective de plecare, reflectând disciplina operațională a serviciilor de transport. Deviația medie a plecărilor pe o linie este formalizată printr-o măsură agregată care compară timpii efectivi și cei programați pentru toate vehiculele și stațiile. Din punct de vedere matematic, aceasta este exprimată ca o sumă normalizată a deviațiilor:

$$P_l = \frac{1}{n_l n_{ij}} \sum_j \sum_i \left(\widehat{D}_{l,i,j}^{act} - D_{l,i,j}^{sched} \right) \qquad (1)$$

unde indicatorul surprinde frecvența relativă a plecărilor care se încadrează într-un interval de deviație predefinit. Această formulare stabilește un reper cantitativ pentru respectarea programului în condiții normale de operare, care ulterior permite identificarea degradării performanței în timpul perturbărilor.

Discuția continuă cu analiza regularității intervalelor de succedare (headway), care este deosebit de relevantă pentru serviciile de transport de înaltă frecvență, unde pasagerii sosesc aleatoriu, fără a urma strict orarul. Headway-ul, definit ca intervalul de timp dintre vehicule consecutive, reprezintă un determinant esențial al timpului de așteptare al pasagerilor și al fiabilității percepute a serviciului. Variabilitatea acestor intervale conduce la fenomene precum gruparea vehiculelor (vehicle bunching), care amplifică incertitudinea și reduce predictibilitatea serviciului. Capitolul introduce doi indicatori principali pentru cuantificarea neregularității headway-urilor. Primul este coeficientul de variație al headway-urilor efective:

$$COV(H_{l,j}^{act}) = \frac{\sigma(H_{l,j}^{act})}{\mathbb{E}[H_{l,j}^{act}]} \quad (2)$$

care măsoară dispersia relativă față de headway-ul mediu. Al doilea indicator este Deviația Medie a Regularității Exprimată în Procente (PRDM), definită ca:

$$PRDM_{l,j} = \frac{1}{n_{l,j}} \sum_{i} \frac{H_{l,i}^{sched} - H_{l,i,j}^{act}}{H_{l,j}^{sched}} \quad (3)$$

Acest indicator surprinde deviația medie a headway-urilor efective față de valorile programate. Aceste formulări sunt semnificative din punct de vedere analitic, deoarece constituie baza conceptuală pentru indicatorii de reziliență bazați pe headway, introduși ulterior în teză, în special pentru cei care surprind instabilitatea serviciului în condiții de perturbare.

După stabilirea indicatorilor de fiabilitate, capitolul examinează cauzele fundamentale ale variabilității și nefiabilității în sistemele de transport public. Pe baza clasificării lui Van Oort, variabilitatea este descompusă în trei componente principale: timpul de deplasare (driving time), timpul de staționare în stații (dwell time) și timpul de oprire (stopping time). Aceste componente sunt influențate atât de factori interni, precum proiectarea orarului, comportamentul conducătorilor și caracteristicile infrastructurii, cât și de factori externi, inclusiv condițiile meteorologice, interacțiunile cu traficul, fluctuațiile cererii de transport și tiparele neregulate de îmbarcare și debarcare a pasagerilor. Diagrama prezentată la pagina 22 ilustrează o rețea cauzală complexă în care multiple variabile interne și externe interacționează pentru a genera variabilitate în timpii de plecare, duratele călătoriilor și consistența serviciului. Din punct de vedere analitic, această figură demonstrează că nefiabilitatea serviciului nu este rezultatul unor factori izolați, ci emerge din dinamici sistemice interconectate, subliniind necesitatea unor abordări de modelare holistice care să surprindă aceste interacțiuni, în loc să trateze perturbările ca evenimente independente.

Capitolul extinde apoi discuția către performanța sistemului în condiții de perturbare, cu un accent deosebit pe suspendările de serviciu pe termen scurt. Reziliența este conceptualizată ca fiind capacitatea unui sistem de a menține sau de a restabili performanța în urma unor perturbări, punându-se accent atât pe comportamentul sistemului în timpul acestora, cât și pe procesele de recuperare. Literatura existentă în acest domeniu este analizată critic, în special studiile care utilizează teoria cozilor de așteptare pentru modelarea acumulării pasagerilor și a dinamicii serviciului. Modelele tradiționale de tip bulk service presupun capacități fixe de servire și independența stațiilor, ipoteze care nu sunt valide în sistemele reale de transport public, unde capacitatea vehiculelor variază, iar interdependențele din rețea sunt semnificative. Pentru a depăși aceste limitări, teza propune un cadru modificat de tip bulk service, care surprinde interacțiunea dinamică dintre vehicule și pasageri, permițând estimarea stabilității sistemului, a lungimii cozilor și a timpilor de așteptare în condiții de perturbare. Această schimbare metodologică este importantă deoarece depășește evaluarea statică a performanței și avansează către analiza comportamentului dinamic al sistemului.

În paralel, capitolul analizează literatura privind perturbările aleatorii ale serviciului, cu accent pe sistemele de așteptare cu defectarea serverelor. Modelele clasice, precum cele dezvoltate de Madan și extinse ulterior de alți cercetători, consideră sisteme cu sosiri stocastice, timpi de servire exponențiali și procese de reparare care intervin după apariția defecțiunilor. Aceste modele introduc conceptul de funcționare a sistemelor în stări alternative de operare și reparare, permițând o caracterizare probabilistică a întreruperilor de serviciu. Cu toate acestea, capitolul evidențiază faptul că majoritatea acestor modele sunt construite pe ipoteza unor canale unice de servire și nu reflectă în mod adecvat complexitatea sistemelor de transport public, unde multiple vehicule operează simultan, iar perturbările se propagă între diferitele componente ale rețelei. Această critică subliniază necesitatea dezvoltării unor modele mai sofisticate, capabile să surprindă dinamici multi-canal și interacțiuni la nivelul întregii rețele.

Secțiunea finală a capitolului abordează cuantificarea rezilienței din perspectiva rețelei. Este introdusă o măsură fundamentală de performanță, bazată pe proporția nodurilor active din rețea, definită ca:

$$\theta(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} s_i \qquad (4)$$

unde $s_i$reprezintă starea operațională a nodului i, luând valori binare între 0 și 1. Această formulare oferă o reprezentare simplificată, dar eficientă, a funcționalității sistemului în timp, permițând derivarea unor caracteristici esențiale ale rezilienței, precum rata de degradare a performanței ($d\theta/dt$), durata totală a indisponibilității, durata recuperării și nivelul maxim de recuperare. Deși această măsură are un caracter abstract, ea constituie un concept fundamental pentru construirea unor metrici de reziliență mai detaliate în capitolele ulterioare.

Pe baza acestui cadru, capitolul introduce evaluarea criticității utilizând măsuri din teoria grafurilor, pentru a identifica nodurile structurale importante din rețea. Sunt discutați doi indicatori principali: gradul nodului și centralitatea de intermediere (betweenness centrality). În timp ce gradul nodului reflectă numărul de conexiuni directe ale acestuia, centralitatea de intermediere cuantifică măsura în care un nod se află pe cele mai scurte drumuri dintre alte noduri. Aceasta din urmă este definită formal ca:

$$BC(v_k) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\sigma_{ij}(v_k)}{\sigma_{ij}} \qquad (5)$$

unde σ_{ij}reprezintă numărul total de cele mai scurte drumuri între nodurile iși j, iar $\sigma_{ij}(v_k)$reprezintă acele drumuri care trec prin nodul k. Nodurile cu valori ridicate ale centralității de intermediere sunt interpretate ca puncte critice de transfer, a căror disfuncționalitate poate perturba semnificativ conectivitatea rețelei. Acest cadru analitic stabilește o legătură directă între topologia rețelei și vulnerabilitatea sistemului, oferind baza pentru identificarea componentelor critice ale infrastructurii.

Capitolul 2 realizează în mod sistematic conexiunea dintre conceptele teoretice și abordările practice de modelare, punând bazele dezvoltării unui cadru cuprinzător de evaluare a rezilienței, bazat pe headway și pe integrarea multimodală, în capitolele următoare.

Capitolul 3 dezvoltă un cadru de evaluare a robusteții structurale pentru sistemele de metrou, utilizând rețeaua de metrou din Bucharest ca studiu de caz empiric. Capitolul începe prin definirea robusteții ca o proprietate la nivel de sistem, care reflectă capacitatea unei rețele de transport de a-și menține integritatea funcțională în condiții de perturbare. Spre deosebire de fiabilitate, care se concentrează pe respectarea orarelor, sau de vulnerabilitate, care surprinde expunerea la riscuri, robustețea este conceptualizată ca abilitatea de a rezista, de a absorbi și de a se recupera în urma perturbărilor. Discuția subliniază faptul că robustețea nu este doar un atribut tehnic, ci și un determinant al încrederii utilizatorilor și al atractivității sistemului, în special în contexte urbane în care transportul public joacă un rol central în mobilitatea sustenabilă. Sunt revizuite abordările timpurii din literatură, evidențiindu-se faptul că sistemele de metrou au fost reprezentate în mod tradițional ca grafuri abstracte, compuse din noduri și legături, iar robustețea a fost inferată pe baza unor indicatori topologici, precum gradul nodurilor, centralitatea de intermediere și diametrul rețelei. Cu toate acestea, capitolul argumentează că astfel de abordări pur structurale sunt insuficiente dacă nu sunt completate de considerații operaționale, precum cererea de transport și constrângerile de capacitate, motivând astfel adoptarea unei perspective analitice hibride care integrează topologia rețelei cu performanța sistemului.

Capitolul continuă prin integrarea conceptului de vulnerabilitate în cadrul analitic al robusteții, urmărindu-i originile în studiile privind dezastrele și definindu-l ca susceptibilitatea unei rețele de transport la evenimente care îi degradează performanța. Sunt identificate trei categorii principale de vulnerabilitate: vulnerabilitatea bazată pe legături (link-based), care analizează consecințele defectării conexiunilor; vulnerabilitatea de capacitate, care se referă la reducerea capacității de transport; și vulnerabilitatea de accesibilitate, care evaluează impactul perturbărilor asupra capacității utilizatorilor de a ajunge la destinații. Aceste categorii nu sunt independente, ci reflectă mecanisme diferite prin care perturbările se propagă în rețea. Analiza evidențiază evoluția metodologică de la evaluări calitative către modelări cantitative, incluzând abordări probabilistice și comportamentale bazate pe echilibrul stocastic al utilizatorilor. În astfel de modele, importanța legăturilor este dedusă din probabilitățile de alegere a rutelor, permițând simularea degradării performanței în cazul eliminării legăturilor critice. Capitolul introduce, de asemenea, dinamica sistemelor ca paradigmă complementară de modelare, capabilă să surprindă buclele de feedback și dependențele temporale, depășind astfel limitările reprezentărilor statice și liniare. Acest fundament teoretic stabilește un cadru analitic cuprinzător pentru identificarea componentelor critice ale rețelei și evaluarea rolului acestora în perturbările la nivel de sistem.

Pe baza acestor fundamente conceptuale, capitolul introduce reprezentarea metodologică a sistemului de metrou ca structură de tip graf. În această abstractizare, stațiile sunt modelate ca noduri, iar segmentele de cale ca muchii, stațiile de transfer având rolul unor noduri de importanță ridicată datorită funcției lor în menținerea conectivității între mai multe linii. Robustețea rețelei este evaluată prin intermediul mai multor indicatori cantitativi, inclusiv

indicele de robustețe r_T, care reflectă disponibilitatea rutelor alternative, și conductanța efectivă a grafului C_G, care măsoară ușurința conectivității între noduri. În plus, sunt definite două praguri critice, $f_{90\%}$și f_C, care reprezintă proporția de eliminare a nodurilor necesară pentru a induce o degradare semnificativă a performanței sau fragmentarea completă a rețelei. Acești indicatori oferă un cadru sistematic pentru evaluarea modului în care rețeaua răspunde la defecțiuni progresive, permițând identificarea punctelor critice (tipping points) în care sistemul trece de la o stare funcțională la una degradată.

Componenta empirică a capitolului se concentrează asupra rețelei de metrou din Bucharest, care cuprinde cinci linii operaționale (M1–M5), aproximativ 64 de stații și o lungime totală a rețelei de circa 78 km. Sistemul deservește aproape 88 de milioane de călătorii anual, evidențiind importanța sa în cadrul sistemului de mobilitate urbană. Structura spațială a rețelei este caracterizată printr-o combinație de forme topologice, inclusiv configurații de tip inel (ring), radial, buclă (loop) și ramificație (branch). Așa cum este ilustrat în Figura 1, linia M1 formează un inel circular în jurul centrului orașului, asigurând conectivitate laterală, în timp ce linia M2 urmează o configurație radială, conectând zonele de nord și sud. Linia M3 introduce o structură de tip buclă, care leagă ramificațiile liniei M1, sporind astfel redundanța, în timp ce linia M4 prezintă o topologie de tip ramificație, cu conexiuni alternative limitate. Extinderile planificate, precum liniile M5 și M6, contribuie suplimentar la complexitatea structurală a rețelei. Această coexistență a mai multor tipuri de topologii conduce la o rețea eterogenă, în care diferite segmente prezintă niveluri variabile de redundanță și susceptibilitate la perturbări. Figura demonstrează analitic modul în care geometria rețelei influențează robustețea, structurile de tip inel și buclă oferind un grad mai ridicat de reziliență comparativ cu configurațiile de tip ramificație, care depind de conexiuni unice.

Modelele cererii de transport ale pasagerilor sunt apoi analizate pentru a completa evaluarea structurală. Rețeaua deservește aproximativ jumătate de milion de călătorii zilnice, cererea fiind distribuită neuniform între linii. Așa cum este ilustrat în Figura 2, liniile M1 și M2 înregistrează cele mai mari volume de pasageri, reflectând rolul lor central în cadrul rețelei.

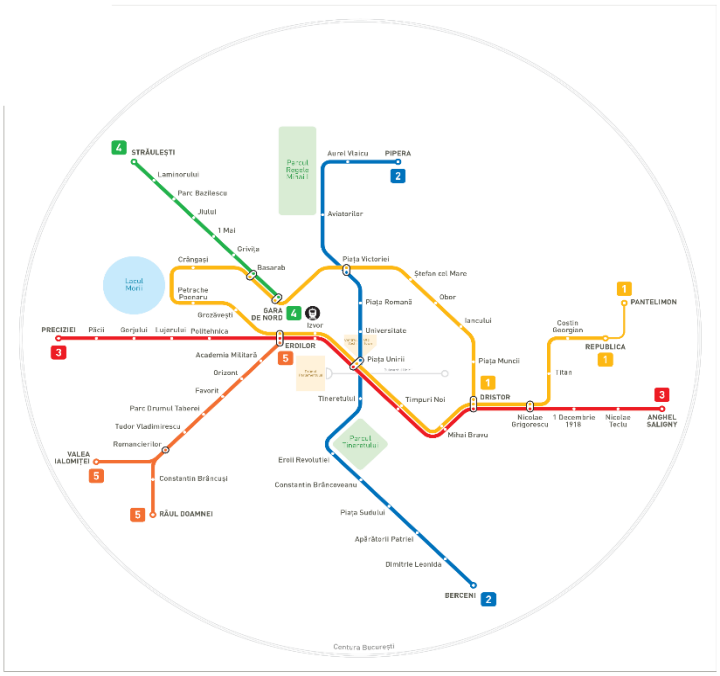


Figura 1: Localizarea și topologia rețelei de metrou din Bucharest

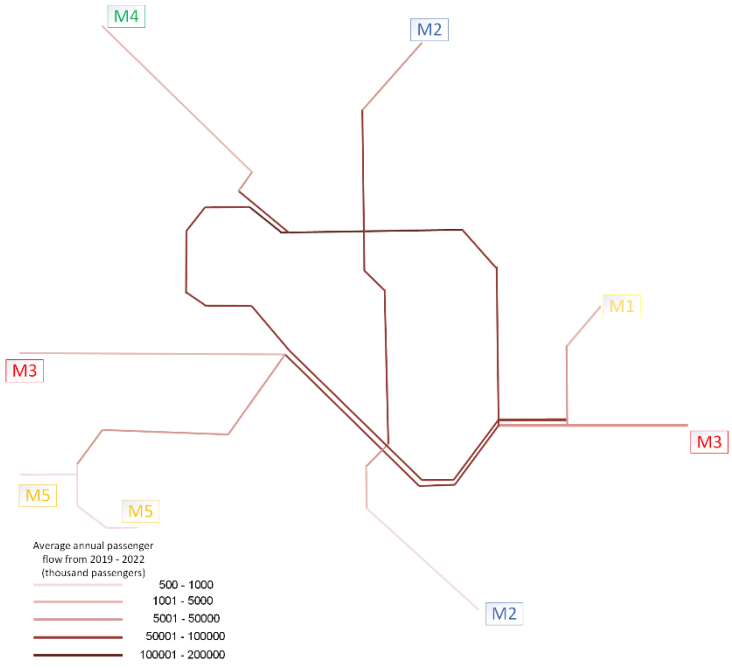


Figura 2: Distribuția anuală a fluxurilor de pasageri ale rețelei de metrou din Bucharest

Variațiile temporale sunt, de asemenea, semnificative, cu cerere maximă înregistrată în perioadele de vârf din timpul dimineții (07:00–09:00) și serii (16:00–18:00). Aceste intervale de vârf reprezintă condiții de stres operațional maxim, în care robustețea sistemului este supusă celor mai exigente teste. Figura ilustrează distribuția spațială a fluxurilor de pasageri, evidențiind coridoarele cu cerere ridicată, care sunt mai vulnerabile la perturbări din cauza intensității încărcării. Această integrare a datelor privind cererea cu topologia rețelei oferă o

înțelegere mai cuprinzătoare a robusteței, deoarece surprinde nu doar conectivitatea structurală, ci și tiparele funcționale de utilizare.

Capitolul integrează, de asemenea, o analiză empirică a evenimentelor de perturbare înregistrate în perioada 2019–2022. Au fost identificate în total 348 de incidente, cu variații anuale cuprinse între 61 de evenimente în 2019 și 105 evenimente în 2021, ceea ce indică o distribuție temporală neuniformă a perturbărilor. Tabelul 2 clasifică aceste incidente în funcție de cauză, evidențiind faptul că defecțiunile tehnice, defecțiunile trenurilor și urgențele legate de pasageri reprezintă cele mai frecvente surse de perturbare.

Tabelul 2: Numărul incidentelor din rețeaua de metrou din Bucharest în funcție de cauza perturbării, în perioada 2019–2022

Cauza perturbărilor	2019	2020	2021	2022	Total general
Defecțiune tehnică	10	21	20	10	61
Defecțiune a trenului	8	13	21	17	59
Urgență legată de pasageri	10	11	19	11	51
Pană de curent	11	12	14	12	49
Defecțiune a sistemului de semnalizare	8	18	14	8	48
Alarmă de incendiu	5	10	11	10	36
Grevă	6	3	1	12	22
Infiltrație de apă	2	2	2	5	11
Amenințare cu bombă			3	6	9
Retragerea trenului din circulație	1				1
Furtună de zăpadă				1	1
Total general	61	90	105	92	348

Grevele, deși mai puțin frecvente, reprezintă evenimente la nivel de sistem cu impact potențial ridicat. Tabelul oferă o descompunere cantitativă a tipurilor de perturbări, demonstrând că atât factorii operaționali, cât și cei umani contribuie în mod conjoint la configurarea profilului de perturbare al rețelei. Această evidență empirică susține argumentul conform căruia evaluarea robusteții trebuie să ia în considerare atât perturbările frecvente și localizate, cât și evenimentele mai rare, dar cu impact extins la nivelul întregului sistem. Se realizează, de asemenea, o distincție analitică suplimentară între perturbările bazate pe noduri și cele bazate pe legături, așa cum este sintetizat în Tabelul 3.

Tabelul 3: Numărul incidentelor din rețeaua de metrou din Bucharest, grupate pe baza perturbărilor de tip nod și legătură, în perioada 2019–2022

Bazate pe noduri		Bazate pe legături	
Cauza perturbărilor	Număr	Cauza perturbărilor	Număr
Pasager în situație de urgență	51	Defecțiune tehnică	61
Pană de curent	49	Defecțiune a trenului	59
Alarmă de incendiu	36	Defecțiune a semnalului	48
Grevă	22	Furtună de zăpadă	1
Scurgere de apă	11		
Amenințare cu bombă	9		
Întoarcerea zborului	1		
Total	179	Total	169

Perturbările bazate pe noduri afectează în principal stațiile, în timp ce perturbările bazate pe legături influențează segmentele de cale și continuitatea liniilor. Analiza relevă că aceste două categorii apar cu o frecvență comparabilă, indicând faptul că ambele trebuie luate în considerare în evaluările de robustețe. În mod important, perturbările localizate, precum defecțiunile trenurilor, apar mai frecvent decât evenimentele la nivel de rețea, subliniind necesitatea integrării perturbărilor de mică amploare, dar cu frecvență ridicată, în modelarea rezilienței. Această constatare pune sub semnul întrebării abordările care se concentrează exclusiv pe scenarii de tip „worst-case”, evidențiind în schimb impactul cumulativ al perturbărilor minore recurente asupra performanței generale a sistemului.

În concluzie, Capitolul 3 stabilește un cadru riguros pentru evaluarea robusteții structurale a rețelelor de metrou, prin integrarea analizei bazate pe teoria grafurilor cu date empirice privind cererea și perturbările. Acesta demonstrează că robustețea este o proprietate multidimensională, influențată de topologia rețelei, distribuția fluxurilor de pasageri și dinamica perturbărilor. Prin studiul de caz al Bucureștiului, capitolul ilustrează modul în care structurile de rețea eterogene prezintă caracteristici diferite de reziliență, nodurile și legăturile critice având un rol disproporționat în menținerea funcționalității sistemului. Combinația dintre modelarea teoretică și validarea empirică oferă o bază solidă pentru capitolele următoare, care extind analiza către reziliența operațională și strategiile de integrare multimodală.

Capitolul 4 examinează interacțiunea dintre modurile de transport urban, concentrându-se asupra echilibrului dintre competiție și complementaritate în cadrul sistemelor multimodale. Acesta susține că serviciile de metrou și autobuz nu trebuie analizate independent, deoarece performanța lor este interdependentă. În funcție de configurația rețelei și de caracteristicile serviciilor, aceste moduri pot fie să concureze pentru pasageri atunci când oferă rute și timpi de călătorie similari, fie să se completeze reciproc prin îmbunătățirea accesibilității, furnizarea de conexiuni de tip feeder și susținerea continuității serviciilor în timpul perturbărilor.

Capitolul dezvoltă un cadru teoretic care combină maximizarea utilității, teoria rețelelor și conceptele de coopetiție. Comportamentul pasagerilor este modelat prin costul generalizat, care integrează timpul de călătorie, timpul de așteptare și penalizările asociate transferurilor, în timp ce teoria rețelelor evidențiază rolul conectivității și al nodurilor intermodale. Teoria coopetiției surprinde natura dual a interacțiunilor modale, în care modurile cooperează și concurează simultan. Utilizând metroul din București ca studiu de caz, analiza estimează utilitatea sistemului, costurile operaționale și probabilitățile de alegere a modului de transport, permițând evaluarea diferitelor scenarii de interacțiune între serviciile de metrou și autobuz.

Rezultatele arată că serviciile paralele necoordonate tind să genereze competiție și ineficiențe, în timp ce configurațiile integrate, precum serviciile de tip feeder sau operațiunile coordonate, îmbunătățesc performanța sistemului prin creșterea accesibilității și a redundanței. Aceste efecte se reflectă în sporirea eficienței, o distribuție mai echitabilă a serviciilor și creșterea sustenabilității prin utilizarea mai eficientă a resurselor. În ansamblu, capitolul demonstrează că coordonarea multimodală este esențială pentru îmbunătățirea rezilienței sistemului, deoarece interacțiunile complementare metrou–autobuz pot atenua impactul perturbărilor și pot menține continuitatea serviciilor.

Capitolul 5 dezvoltă un cadru cantitativ pentru evaluarea rezilienței sistemelor de metrou prin formularea și aplicarea unui Indice de Reziliență Modificat (MRI), cu un accent specific asupra rețelei de metrou din București. Capitolul începe prin redefinirea rezilienței dintr-un concept bazat exclusiv pe infrastructură către o perspectivă operațională, subliniind capacitatea sistemului de a menține continuitatea serviciilor în condiții de perturbare și de a reveni la niveluri acceptabile de performanță. Se argumentează că reziliența trebuie să țină cont de interdependențele dintre infrastructură, operațiuni și sistemele externe de suport, precum rețelele de alimentare cu energie și comunicații. Această schimbare conceptuală este deosebit de relevantă în contextul Bucureștiului, unde infrastructura îmbătrânită și cererea în creștere amplifică vulnerabilitatea, necesitând o abordare de evaluare fundamentată empiric și sensibilă din punct de vedere operațional.

Cadrul metodologic este construit pe integrarea datelor din surse multiple și pe analiza bazată pe rețele. Datele operaționale din rapoartele anuale Metrorex (2019–2024) sunt combinate cu înregistrări istorice ale perturbărilor pentru a surprinde atât performanța în condiții normale, cât și în situații de perturbare. Variabilele cheie sunt extrase sistematic, incluzând severitatea perturbărilor, extinderea spațială, durata și impactul asupra pasagerilor. Sistemul de metrou este reprezentat ca un graf ponderat și orientat, permițând identificarea blocajelor prin analize spațio-temporale la o rezoluție temporală fină (intervale de 15 minute). Această abordare evidențiază tipare de congestie și noduri critice a căror perturbare ar afecta în mod disproporționat performanța sistemului. Astfel, cadrul analitic corelează dinamica fluxurilor de pasageri cu proprietățile structurale ale rețelei, permițând interpretarea rezilienței ca o proprietate emergentă rezultată din interacțiunea dintre distribuția cererii și topologia rețelei.

Elementul central al capitolului îl constituie definirea formală a Indicelui de Reziliență Modificat (MRI), care agregă performanța sistemului în condiții de perturbare. MRI este exprimat ca o funcție normalizată a cererii și a nivelului de furnizare a serviciului:

$$MRI = \frac{\sum_i Q_{\text{req},i}\left(H_{\text{ava},i} - H_{\text{req},i}\right)}{\sum_i Q_{\text{req},i} H_{\text{req},i}} \quad (6)$$

unde $Q_{req,i}$denotă cererea de pasageri în stația i, $H_{ava,i}$reprezintă capacitatea de serviciu disponibilă, iar $H_{req,i}$indică nivelul de serviciu necesar în condiții de perturbare. Această formulare surprinde decalajul dintre capacitatea operațională disponibilă și cea necesară, ponderat cu cererea de pasageri, reflectând astfel atât constrângerile de pe partea ofertei, cât și presiunile de pe partea cererii. Pe lângă această formulare la nivel de rețea, capitolul introduce un model statistic complementar în care reziliența este conceptualizată ca o funcție compusă din patru componente-cheie: intensitatea perturbării I(aproximată printr-un Factor de Vulnerabilitate al Trenului), aria afectată A(ponderea călătorilor impactați), durata evenimentului T_Eși consecințele C(aproximate prin efectele întârzierilor asupra pasagerilor). Aceste componente sunt integrate într-o structură funcțională inspirată din teoria fiabilității, sugerând că reziliența rezultă din interacțiunea mai multor factori interdependenți, și nu din influența unei singure variabile.

Rezultatele empirice evidențiază o eterogenitate semnificativă a rezilienței între liniile de metrou, perioadele de timp și condițiile operaționale. Rezultatele prezentate în tabele indică faptul că valorile rezilienței variază între perioadele de vârf și cele din afara orelor de vârf, o stabilitate mai ridicată fiind în general observată în weekenduri datorită unei cereri mai reduse și mai predictibile. Analiza pe linii arată că Linia M1 prezintă o reziliență relativ ridicată și în îmbunătățire în timp, în special după anul 2020, sugerând existența unor mecanisme eficiente de adaptare și recuperare. În schimb, liniile M2 și M4 manifestă o variabilitate mai mare, indicând o sensibilitate crescută la fluctuațiile cererii și la stresul operațional. Evoluția temporală a rezilienței reflectă, de asemenea, influențe externe, inclusiv modificările cererii generate de pandemie și extinderea rețelei, integrarea Liniei M5 contribuind pozitiv la reziliența generală a sistemului. Aceste rezultate demonstrează că reziliența nu este o proprietate statică, ci evoluează ca răspuns atât la schimbările interne ale sistemului, cât și la șocurile externe.

Componenta de modelare statistică rafinează suplimentar aceste rezultate prin facilitarea analizei predictive a comportamentului rezilienței. Modelul este calibrat utilizând tehnici de regresie pentru a estima parametrii care guvernează influența intensității, ariei afectate, duratei și consecințelor asupra rezultatelor privind reziliența. Componenta consecințelor este formulată explicit ca:

$$C = \text{Ridership} \times \text{Duration} \times \text{Number of Events} \quad (7)$$

stabilind o legătură între frecvența și severitatea perturbărilor și impactul asupra pasagerilor. Analiza de sensibilitate demonstrează că schema de ponderare aplicată factorilor de vulnerabilitate rămâne robustă în condițiile unor variații moderate ale parametrilor, indicând stabilitatea structurii modelului. Cu toate acestea, calibrarea este recunoscută ca fiind internă

indicelui construit, și nu validată extern, evidențiind o limitare metodologică legată de absența unor repere independente de evaluare a rezilienței.

În discuții, capitolul subliniază că evaluarea rezilienței trebuie să integreze atât dimensiunile spațiale, cât și cele temporale ale performanței sistemului. Integrarea identificării blocajelor cu modelarea rezilienței permite determinarea unor praguri critice dincolo de care sistemul trece de la o funcționare stabilă la una instabilă. Rezultatele evidențiază importanța factorilor operaționali, precum frecvența serviciului, fiabilitatea materialului rulant și distribuția pasagerilor, în configurarea nivelului de reziliență, completând analizele structurale tradiționale. În plus, diferențele observate între performanța din zilele lucrătoare și cea din weekend evidențiază rolul variabilității cererii ca factor determinant al degradării rezilienței.

Capitolul se încheie prin stabilirea Indicelui de Reziliență Modificat (MRI) ca un instrument practic și ușor de interpretat pentru cuantificarea rezilienței sistemelor de metrou în condiții de perturbare. Acesta demonstrează că reziliența poate fi măsurată în mod sistematic utilizând date operaționale, permițând comparații între linii, perioade de timp și scenarii de perturbare. În același timp, rezultatele sugerează că îmbunătățirea rezilienței necesită intervenții țintite care să abordeze atât fiabilitatea infrastructurii, cât și managementul operațional, în special în coridoarele cu cerere ridicată și în nodurile critice ale rețelei. În ansamblu, Capitolul 5 oferă o bază analitică riguroasă pentru capitolele următoare, prin integrarea datelor empirice, a analizei de rețea și a modelării statistice într-un cadru coerent pentru cuantificarea rezilienței.

Capitolul 6 dezvoltă un cadru analitic cuprinzător pentru identificarea și modelarea blocajelor în sistemele de metrou, cu un accent deosebit asupra comportamentului pasagerilor în condiții de perturbare și asupra implicațiilor acestuia asupra performanței sistemului. Capitolul începe prin conceptualizarea întreruperilor de serviciu nu doar ca anomalii operaționale, ci ca declanșatori ai unor răspunsuri dinamice ale sistemului, care implică atât constrângeri de infrastructură, cât și procese decizionale ale pasagerilor. Se stabilește că degradarea rezilienței este puternic mediată de modul în care pasagerii se adaptează la perturbări, ceea ce face ca modelarea comportamentală să devină o componentă esențială a analizei blocajelor. Astfel, capitolul extinde abordările tradiționale bazate pe capacitate, prin integrarea perspectivelor comportamentale și a performanței sistemului într-un cadru unificat.

Fundamentul metodologic este structurat în jurul a două niveluri analitice interconectate. Primul este un nivel comportamental, bazat pe teoria alegerii discrete, care modelează modul în care pasagerii selectează opțiuni alternative de călătorie în timpul perturbărilor. Al doilea este un nivel al performanței sistemului, care transpune aceste răspunsuri comportamentale în efecte la nivel de rețea, precum congestia, redistribuirea fluxurilor și dinamica de recuperare. Această structură pe două niveluri permite analizei să surprindă atât impactul imediat al perturbărilor asupra deciziilor pasagerilor, cât și propagarea ulterioară a acestor efecte în întreaga rețea. Prin corelarea alegerilor la nivel individual cu performanța agregată a sistemului, cadrul oferă o reprezentare mai realistă a modului în care blocajele apar și evoluează.

La nivel empiric, capitolul utilizează un set de date alcătuit din 348 de evenimente de perturbare înregistrate în sistemul de metrou din București între anii 2019 și 2022. Aceste perturbări sunt

clasificate în funcție de cauză, evidențiind o concentrare într-un număr limitat de categorii dominante, inclusiv defecțiuni tehnice (17,5%), defecțiuni ale trenurilor (16,95%) și urgențe ale pasagerilor (14,65%). Această distribuție indică faptul că atât factorii operaționali, cât și cei de natură umană contribuie în mod conjunct la instabilitatea sistemului. Pe lângă analiza frecvenței, capitolul examinează și tiparele duratei de recuperare, arătând că aproximativ 80% dintre perturbări sunt rezolvate în decurs de o oră, în timp ce restul de 20% persistă mai mult și exercită un impact disproporționat asupra performanței sistemului. Această distribuție temporală este esențială, întrucât perturbările de durată mai mare sunt mai susceptibile să genereze congestii în lanț și condiții persistente de blocaj.

Un element central al capitolului îl constituie formalizarea alegerii pasagerilor în condiții de perturbare prin utilizarea unui model logit multinomial (MNL). Procesul de modelare începe cu construirea unei funcții de cost generalizat pentru fiecare alternativă i, definită ca:

$$GC_i = VoT \cdot T_i + C_i \tag{8}$$

unde VoTreprezintă valoarea timpului, $T_i$este timpul de călătorie, iar $C_i$este costul monetar. Această formulare transformă atributele eterogene ale călătoriei într-o metrică unificată a costului, permițând compararea coerentă între alternative. Costul generalizat este apoi transformat într-o funcție de utilitate:

$$V_i = -\beta \cdot GC_i \tag{9}$$

cu $\beta = 1$presupus pentru normalizare, reflectând un cadru de comparație determinist, mai degrabă decât un model comportamental estimat empiric. În final, probabilitățile de alegere sunt derivate utilizând structura logit multinomial:

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^{J} e^{V_j}}, \tag{10}$$

asigurând că probabilitățile sunt pozitive și însumează unitatea. Această formulare secvențială oferă o corespondență transparentă între condițiile de călătorie și comportamentul pasagerilor.

Rezultatele numerice derivate din acest model ilustrează modul în care diferențele de cost generalizat se traduc în probabilități de alegere puternic diferențiate. De exemplu, alternativele cu timpi de călătorie moderați și costuri reduse domină preferințele pasagerilor, în timp ce opțiunile caracterizate prin timpi excesivi de deplasare sau inconvenient ridicat prezintă probabilități de selecție neglijabile. Un tabel reconstruit al costurilor generalizate (Tabelul 4) arată că alternativele cu costuri totale în jur de 7–8 € captează majoritatea cererii, în timp ce opțiunile cu costuri ridicate (de exemplu, 16 €) sunt practic ignorate. Aceste rezultate demonstrează că chiar și diferențe reduse de cost de călătorie pot influența semnificativ

redistribuirea pasagerilor în timpul perturbărilor, modelând astfel formarea și intensitatea blocajelor.

Tabelul 4: Costuri generalizate de călătorie comparative asociate alegerilor modale induse de perturbări

Alternativă	Costul timpului (€)	Tarif/cheltuială (€)	Cost total (€)
A1	41 min → €6.8	€1	€7.8
A2	36 min → €6.0	€1	€7.0
A3	55 min → €9.2	€1	€10.2
A4	25 min → €4.2	€4	€8.2
A5	96 min → €16.0	€0	€16.0

Capitolul trece apoi la o analiză detaliată a blocajelor, fundamentată pe modelarea fluxurilor de pasageri. Rețeaua de metrou din Bucharest este analizată ca studiu de caz, cu un accent deosebit pe coridoarele cu cerere ridicată, precum trunchiul M1–M3, și pe stațiile majore de transfer, inclusiv Piața Unirii și Gara de Nord. Blocajele sunt conceptualizate ca constrângeri locale de capacitate care pot propaga întârzieri în întreaga rețea atunci când cererea se apropie sau depășește capacitatea disponibilă. Această condiție este cuantificată utilizând raportul de utilizare a capacității:

$$CUR(t) = \frac{D(t)}{C} \qquad (11)$$

unde $D(t)$reprezintă cererea observată, iar Ceste capacitatea de proiectare. Valorile CURcare se apropie de unitate indică o încărcare critică, în timp ce valorile care depășesc 1 semnifică condiții de supraîncărcare și debutul formării cozilor. Pentru a surprinde efectele spațiale ale congestiei, analiza introduce densitatea pasagerilor ca indicator cheie, definită ca:

$$d(t) = \frac{N(t)}{A} \qquad (12)$$

unde $N(t)$reprezintă numărul de pasageri, iar Aeste suprafața disponibilă. Praguri empirice de 4–6 pasageri pe metru pătrat sunt utilizate pentru identificarea condițiilor de supraaglomerare, dincolo de care calitatea serviciului se deteriorează rapid. În plus, este introdus conceptul de timp peste prag (ToT) pentru a măsura durata în care elementele sistemului funcționează în condiții critice, integrând astfel persistența temporală în identificarea blocajelor. Acest indicator este deosebit de important în perioadele de vârf, când creșterile scurte, dar intense ale cererii pot declanșa congestii persistente.

Rezultatele evidențiază faptul că blocajele nu sunt determinate exclusiv de capacitățile legăturilor, ci și de interacțiunile la nivel de noduri, în special în stațiile de transfer unde converg multiple fluxuri. Chiar și atunci când legăturile individuale funcționează sub capacitate, nodurile cu centralitate ridicată și activitate intensă de transfer pot deveni puncte critice de avarie. Această constatare subliniază importanța luării în considerare a topologiei rețelei și a convergenței fluxurilor de pasageri în analiza blocajelor. În plus, se arată că interacțiunea dintre alegerea pasagerilor și constrângerile rețelei amplifică efectele congestiei, deoarece pasagerii redirecționați se concentrează pe un set limitat de alternative, crescând

presiunea asupra segmentelor deja critice. În discuții, capitolul subliniază că formarea blocajelor este un fenomen dinamic și multidimensional, determinat de interacțiunea dintre cerere, capacitate și adaptarea comportamentală. Integrarea modelării alegerii discrete cu indicatorii de performanță bazați pe fluxuri oferă o înțelegere mai cuprinzătoare a modului în care perturbările se propagă în sistem. Cadrul evidențiază, de asemenea, importanța identificării unor praguri critice, precum gradul de utilizare a capacității și limitele de densitate, dincolo de care performanța sistemului se degradează rapid, iar recuperarea devine mai dificilă.

Capitolul se încheie prin demonstrarea faptului că evaluarea eficientă a rezilienței trebuie să integreze atât constrângerile infrastructurale, cât și comportamentul pasagerilor. Blocajele sunt evidențiate ca mecanisme-cheie prin care perturbările localizate evoluează către degradarea performanței la nivel de sistem. Prin cuantificarea acestor mecanisme prin intermediul indicatorilor analitici și al modelelor comportamentale, capitolul oferă o bază pentru proiectarea unor intervenții țintite, precum ajustarea capacității, strategii de informare a pasagerilor și măsuri de integrare multimodală, în vederea reducerii congestiei și îmbunătățirii rezilienței generale a sistemului.

Capitolul 7 dezvoltă un cadru de reziliență bazat pe intervalul de succedare (headway), care integrează explicit utilizarea serviciilor de tip bus bridging ca mecanism operațional pentru menținerea continuității serviciului și accelerarea recuperării în sistemele de metrou afectate de perturbări. Capitolul începe prin redefinirea rezilienței dintr-un concept structural sau determinat de topologia rețelei către o perspectivă orientată pe nivelul serviciului, centrată pe regularitatea headway-ului, disponibilitate și experiența pasagerilor. Se argumentează că robustețea structurală, în sine, nu poate garanta performanța funcțională, întrucât pasagerii percep reziliența în principal prin stabilitatea timpilor de așteptare, accesibilitatea continuă și existența unor alternative viabile în timpul perturbărilor. Această schimbare conceptuală stabilește headway-ul ca variabilă operațională fundamentală prin care impactul perturbărilor și dinamica recuperării trebuie evaluate.

Dezvoltarea metodologică continuă prin poziționarea serviciilor de tip *bus bridging* ca instrumente deliberate de redundanță și continuitate, și nu ca simple măsuri reactive de contingență. Cadrul identifică trei mecanisme principale prin care aceste servicii contribuie la reziliență: stabilizarea headway-ului prin compensarea capacității feroviare pierdute, menținerea disponibilității serviciului prin asigurarea conectivității între stațiile afectate și îmbunătățirea rapidității recuperării prin creșterea flexibilității operaționale. Aceste mecanisme sunt operaționalizate prin variabile de proiectare precum generarea rutelor candidate, alocarea flotei, frecvența serviciului și aproximarea timpilor de așteptare, permițând evaluarea sistematică a strategiilor de tip *bridging*, în locul implementării acestora pe baze euristice.

În centrul cadrului se află un set de indicatori cantitativi care descriu în mod colectiv reziliența la nivelul serviciului. Deviația medie a intervalului de succedare (Mean Headway Deviation – MHD) măsoară abaterea headway-urilor reale față de valorile programate, surprinzând instabilitatea pe termen scurt a furnizării serviciului. Raportul de disponibilitate a serviciului (Service Availability Ratio – SAR) reprezintă proporția rețelei care rămâne operațională în timpul perturbărilor, reflectând continuitatea serviciului. Indicele de redundanță a sistemului

(System Redundancy Index – SRI) cuantifică disponibilitatea rutelor alternative și a conexiunilor multimodale, crescând atunci când serviciile suplimentare de autobuz creează rute independente sau paralele. Acești indicatori sunt concepuți pentru a surprinde dimensiuni complementare ale rezilienței: regularitatea temporală, acoperirea spațială și redundanța structurală.

Aceste componente sunt integrate într-o funcție compozită a rezilienței, care sintetizează natura multidimensională a performanței serviciului în condiții de perturbare. Indicele de reziliență este definit ca:

$$RI = w_1\left(1-\frac{MHD_s}{MHD_0}\right) + w_2\frac{SAR_s}{SAR_0} + w_3\frac{C_s}{C_0} \qquad (13)$$

unde $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, iar rapoartele compară performanța în stare de perturbare cu condițiile de referință. Această formulare asigură faptul că reziliența crește atunci când deviațiile headway-ului scad și când disponibilitatea și conectivitatea se îmbunătățesc. Includerea parametrilor de ponderare permite modelului să reflecte importanța relativă a diferitelor dimensiuni ale performanței, menținând în același timp interpretabilitatea și comparabilitatea între scenarii. În plus, un factor de redundanță

$$R_f = 1 + \alpha(SRI - 1) \qquad (14)$$

este introdus pentru a surprinde efectul de amplificare al rutelor alternative suplimentare, corelând în mod direct redundanța structurală cu reziliența funcțională.

Cadrul integrează, de asemenea, concepte dinamice de performanță, precum timpul de recuperare, definit ca durata necesară pentru ca deviația headway-ului să revină sub un prag predefinit de stabilitate. Această dimensiune temporală este esențială pentru a distinge între sistemele care doar absorb perturbările și cele care se recuperează eficient.Prin integrarea acestor indicatori într-o structură analitică unificată, modelul permite construirea unor curbe de reziliență care descriu performanța sistemului înainte, în timpul și după evenimentele de perturbare. Aceste curbe oferă o interpretare grafică a proceselor de degradare și recuperare, evidențiind modul în care diferitele strategii de tip *bus bridging* influențează atât amplitudinea, cât și durata pierderii de performanță.

Aplicarea empirică se concentrează asupra sistemului de metrou din Bucharest, unde cadrul este utilizat pentru a evalua configurații alternative de tip *bus bridging* în scenarii de perturbare la nivel de coridor. Sunt analizate trei scenarii principale: un scenariu de bază exclusiv metrou, o strategie standard de *bus bridging* pe segmente scurte și o configurație extinsă sau paralelă, caracterizată printr-o integrare multimodală mai puternică. Rezultatele demonstrează îmbunătățiri clare ale performanței pe măsură ce intensitatea intervențiilor de tip *bridging* crește. În mod specific, introducerea unor soluții de *bridging* extinse reduce deviația medie a headway-ului de la aproximativ +4,0 minute la +1,5 minute, crește disponibilitatea serviciului (SAR) de la 0,82 la 0,95 și majorează redundanța sistemului (SRI) de la 0,46 la 0,63. Aceste îmbunătățiri se traduc într-o creștere semnificativă a indicelui compozit de reziliență, de la 0,46

(reziliență moderată) la 0,72 (reziliență ridicată), fiind însoțite de o reducere a timpului de recuperare de la 55 de minute la 30 de minute.

Analiza evidențiază, de asemenea, importanța parametrilor de proiectare în configurarea rezultatelor privind reziliența. Factori precum acoperirea spațială a serviciului, penalizările de transfer și coordonarea orarelor între serviciile de metrou și autobuz influențează semnificativ eficiența strategiilor de tip *bus bridging*. Studiul arată că configurațiile de *bridging* care oferă coridoare de serviciu paralele sau suprapuse, în locul unor substituții izolate, generează câștiguri mai mari de reziliență prin îmbunătățirea atât a redundanței, cât și a accesibilității. În plus, integrarea orarelor multimodale atât în condiții normale, cât și în situații de perturbare contribuie la reducerea timpilor de așteptare și la o distribuție mai echilibrată a pasagerilor, consolidând capacitatea de absorbție a sistemului.

În discuții, capitolul subliniază că reziliența este în mod inerent o proprietate funcțională care rezultă din interacțiunea dintre regularitatea serviciului, conectivitatea rețelei și comportamentul pasagerilor. Cadrul bazat pe headway demonstrează că menținerea unor intervale de succedare stabile este la fel de critică precum conservarea topologiei rețelei, în special în sistemele de metrou cu frecvență ridicată, unde pasagerii se bazează pe o programare implicită. Rezultatele indică, de asemenea, că perturbările localizate pot fi gestionate eficient prin strategii de *bus bridging* bine concepute, prevenind propagarea întârzierilor și atenuând apariția efectelor în cascadă la nivelul rețelei.

Capitolul 8 sintetizează teza prin integrarea perspectivelor structurale, operaționale și multimodale asupra rezilienței sistemelor de metrou, subliniind faptul că reziliența este în mod fundamental o proprietate operațională, și nu exclusiv una structurală. Deși rețeaua de metrou din București prezintă o robustețe structurală moderată, menținând o conectivitate ridicată până la eliminarea a aproximativ 15% din noduri, acest lucru nu garantează o performanță stabilă a serviciului în condiții de perturbare. În schimb, reziliența este percepută prin stabilitatea headway-ului, disponibilitatea serviciului și viteza de recuperare, evidențiind necesitatea de a completa analiza topologiei rețelei cu indicatori operaționali.

Capitolul consolidează două contribuții metodologice principale: Indicele de Reziliență Modificat (MRI), care cuantifică reziliența utilizând variabile legate de perturbări, precum intensitatea, durata și aria afectată, și cadrul bazat pe headway, care evaluează performanța la nivel de serviciu prin indicatori precum deviația medie a intervalului de succedare (Mean Headway Deviation – MHD), raportul de disponibilitate a serviciului (Service Availability Ratio – SAR) și indicele de redundanță a sistemului (System Redundancy Index – SRI). Rezultatele arată că reziliența scade abrupt atunci când perturbările se extind spațial, indicând faptul că cedarea sistemului rezultă din efectele combinate ale instabilității, reducerii disponibilității și propagării în nodurile critice.

O concluzie centrală este că serviciile de tip *bus bridging* îmbunătățesc semnificativ reziliența prin stabilizarea serviciului, menținerea conectivității și accelerarea procesului de recuperare. Analizele de scenarii demonstrează că strategiile de *bridging* mai extinse și mai bine coordonate conduc la deviații mai reduse ale headway-ului, la o disponibilitate mai ridicată și la timpi de recuperare mai scurți. În plus, coordonarea multimodală în condiții normale, precum

sincronizarea orarelor, contribuie de asemenea la consolidarea rezilienței prin creșterea flexibilității rețelei.

În final, capitolul recunoaște limitări legate de disponibilitatea datelor, modelarea comportamentală simplificată și caracterul de studiu de caz unic. Cercetările viitoare sunt orientate către integrarea datelor operaționale de înaltă rezoluție, îmbunătățirea realismului comportamental și extinderea cadrului analitic la alte rețele urbane.