

Traducere din limba engleză



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII
BUCUREȘTI
Facultatea de Construcții Civile, Industriale și Agricole

DOCTORAND: ING. ARIF WEAAM

REZUMATUL SINTETIC AL TEZEI

COMPORTAREA ȘI CALCULUL SEISMIC AL STRUCTURILOR NEREGULATE DIN BETON ARMAT

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT
CONF. DR. ING. IOLANDA-GABRIELA CRAIFALEANU

BUCUREȘTI
2023

PREAMBUL

Tendința de a construi structuri cu configurație neregulată a crescut în ultimele decenii ca urmare a cerințelor arhitecturale și estetice, precum și din cauza disponibilității limitate a suprafețelor pentru construcții. Multe tipuri uzuale de cedări ale construcțiilor din beton armat sunt legate de neregularitatea structurală. În funcție de modul de proiectare, neregularitățile structurale care afectează comportamentul structural sau rezistența la acțiuni statice și dinamice diferă foarte mult. În proiectare, sursa de referință în definirea acestor neregularități în funcție de configurația geometrică și comportamentul dinamic sunt codurile antiseismice. Prevederile Eurocodului 8 [1] și ASCE/SEI 7-16 [2] sunt utilizate în mare măsură. Deși în Irak se utilizează noul cod seismic irakian, ISC 2016 [3], acesta se bazează în principal pe Codul Internațional al Construcțiilor, IBC 2012[4], și pe ASCE/SEI 7-10 [5]. Cercetările anterioare au arătat că structurile cu configurații neregulate sunt mai vulnerabile la mișcările puternice ale solului decât structurile regulate. Fiabilitatea evaluării răspunsului seismic pentru clădirile cu neregularități devine mai complicată din cauza trecerii comportării clădirii din domeniul liniar în cel neliniar și a modificărilor continue ale distribuției rigidității și rezistenței în timpul cutremurului. O metodă superioară de evaluare a comportării neliniare este abordarea bazată pe analiza statică neliniară (*pushover*), destinată evaluării seismice a structurilor care au în principal un răspuns translațional. Suplimentar abordării *pushover*, se utilizează analiza dinamică neliniară. Aceasta este cea mai precisă metodă de analiză, de o utilitate deosebită și în cazul structurilor cu neregularități de plan.

Obiectivul acestei teze este de a efectua o analiză a diferiților parametri și caracteristici (forțe interne, perioadă, deplasare relativă de nivel, indice de vulnerabilitate, factor de ductilitate, factor de suprarezistență, factor de comportare, curbe de fragilitate) ale structurilor din beton armat cu neregularități în elevație și în plan și de a evalua influența acestora asupra performanței seismice. În plus, teza își propune să studieze efectele neregularităților în elevație și în plan asupra răspunsului sistemelor structurale, prin compararea rezultatelor furnizate de diferite metode (analiza modală bazată pe spectrul de răspuns, analiza statică neliniară și analiza dinamică neliniară) și să investigheze dacă metodele și abordările actuale utilizate în coduri și reglementări sunt adecvate și pot reflecta cu acuratețe performanța seismică a clădirilor neregulate.

În consecință, au fost realizate două categorii de studii de caz analitice. Prima s-a referit la o clădire cu nouă etaje din beton armat cu sistem dual (pereți-cadre), situată în București, clasificată ca fiind asimetrică în plan și proiectată în conformitate cu prevederile Eurocodului 8 [1] și Eurocodului 2 [6], prin aplicarea metodei spectrului de răspuns. Verificarea criteriilor de regularitate în plan a fost discutată în conformitate cu codurile Eurocode 8-1:2004 [1], ASCE 7-16 [2] și P100-1/2013 [7]. Comportamentul seismic al clădirii studiate a fost investigat prin utilizarea metodei de analiză statică neliniară (*pushover*), realizată pe modelul 3D al clădirii. În continuare, rezultatele au fost comparate cu cele obținute prin analiza neliniară de tip "time-history" (THA). Rezultatele privind răspunsul structural (global și local) au fost analizate în conformitate cu Eurocodul 8. Ulterior, acest studiu a estimat unghiul critic de incidență al acțiunii seismice pentru clădirea studiată, luând în considerare limitarea deplasării relative de nivel (LID), deplasarea relativă maximă între niveluri (MLID) pe înălțimea clădirii și indicele de vulnerabilitate seismică (SVI) al clădirii. Influența direcționalității asupra răspunsului clădirii a fost investigată prin analize dinamice neliniare, prin aplicarea a șapte accelerograme bidirecționale scalate, orientate după 8 unghiuri de incidență cu valori cuprinse între 0° și 315° , cu un increment de 45° . Pentru evaluarea influențelor direcționalității seismice, au fost combinați doi parametri de cerințe, și anume MLID de-a lungul înălțimii clădirii și SVI estimat, pentru a determina cel mai critic unghi de incidență. Din rezultate, s-a constatat că răspunsurile maxime la mișcările seismice individuale ale terenului pot apărea la orice unghi de incidență, care nu este neapărat 0° sau 90° , și că răspunsurile depind în mare măsură de caracteristicile semnalului, și nu doar de caracteristicile structurii. Cea de-a doua categorie de studii de caz s-a concentrat pe patru clădiri din

beton armat cu șase etaje, cu configurații diferite ale retragerilor la nivelurile superioare și proiectate pentru locații din Bagdad, Irak, și care au fost studiate în vederea evaluării vulnerabilității lor seismice. Clădirile, cu umplutură de zidărie la primele două etaje, clasificate ca fiind neregulate pe verticală, au fost dimensionate în conformitate cu prevederile codului seismic irakian, ale ASCE 7-16 [2] și ale ACI 318-19 [8]. Au fost efectuate analize statice neliniare (pushover) pentru a calcula curbele de capacitate, apoi au fost determinate seturi de curbe de fragilitate pentru a estima probabilitatea de avariere seismică, în termeni de deplasări spectrale. Deplasarea-țintă a fost identificată pe curba pushover prin utilizarea metodei coeficientului modificat din FEMA 440 [9], adoptată în ASCE/SEI 41-13 [10], iar apoi a fost stabilită curba idealizată forță-deplasare, pentru a obține punctul de plastificare al modelelor. Curba pushover a fost determinată pentru trei distribuții de solicitări laterale: distribuția forțelor laterale echivalente, distribuția uniformă și distribuția corespunzătoare primului mod propriu de vibrație, pentru a lua în considerare diverse acțiuni care pot apărea pe durata răspunsului seismic efectiv și pentru a identifica cel mai defavorabil caz, care va fi cel care va governa calculele ulterioare. Ponderea (gradul) retragerilor la modelele studiate a fost evaluată pentru a se lua în considerare influența acesteia în creșterea riscului de avariere locală. Din rezultate s-a putut observa că, pe măsură ce ponderea retragerilor (neregularităților verticale) crește, probabilitatea de apariție a riscului de avariere crește, iar modelele prezintă o performanță seismică mai slabă. Curbele de fragilitate determinate în acest studiu ar putea reprezenta o bază preliminară pentru stabilirea unor scenarii de risc seismic pentru Bagdad, pentru clădirile cu neregularitate pe verticală având retrageri la nivelurile superioare. Cu toate acestea, se consideră necesară o prelucrare suplimentară a acestor curbe, pentru a ține cont de variația potențială a parametrilor de intrare selectați pentru analiza neliniară, de pragurile stadiilor de avariere și de ipotezele utilizate pentru determinarea curbilor de fragilitate pentru fiecare dintre stările de avariere de referință.

Teza conține 5 capitole, o listă a publicațiilor autoarei, o bibliografie și patru anexe, totalizând 293 de pagini. În acest rezumat sintetic sunt prezentate selectiv cele mai importante elemente ale studiului. Numerotarea capitolelor este proprie rezumatului.

CAPITOLUL UNU

1 RĂSPUNSUL SEISMIC AL STRUCTURILOR DIN BETON ARMAT CU NEREGULARITATE ÎN PLAN

1.1 Generalități

Pentru studiul de caz prezentat, au fost efectuate analize liniare și neliniare aprofundate asupra unei clădiri din beton armat (RC) cu mai multe niveluri, clasificată ca fiind asimetrică în plan și proiectată pentru zona seismică a Bucureștiului, utilizând codurile românești și europene (P100-1/2013, EN 1992-1-1:2004 și EN 1998-1:2004). Clădirii i s-a aplicat metoda statică neliniară în conformitate cu Eurocodul 8, partea 3 (EN 1998-3:2006), iar rezultatele au fost ulterior comparate cu cele obținute în urma analizei neliniare de tip "time-history" (THA). Pe baza rezultatelor analizelor liniare și neliniare, au fost investigați diverși parametri, în ceea ce privește conformitatea cu criteriile specificate de codurile luate în considerare pentru clădirile cu neregularitate în plan, cum ar fi efectele modurilor superioare asupra deplasărilor relative de nivel și a deplasării la ultimul nivel, forța tăietoare de bază și indicele de vulnerabilitate seismică (SVI). Studiul de față investighează, de asemenea, impactul unghiului de incidență al mișcării terenului prin analize *time-history* efectuate asupra clădirii studiate, supuse la diferite accelerograme bidirecționale scalate, orientate de-a lungul a opt unghiuri de incidență. Baza de date PEER a fost utilizată pentru a determina cele mai adecvate înregistrări de cutremur, scalate pentru o accelerație maximă a solului $PGA = 0,30\text{ g}$ și pentru spectrul de răspuns elastic specificat pentru București conform P100-1/2013. Anume, fiecare accelerogramă este aplicată la unghiuri cuprinse între 0° și 315° , cu incremente de 45° . Sunt combinați doi parametri de cerință, deplasarea relativă maximă între niveluri (MLID) pe înălțimea clădirii și indicele de vulnerabilitate seismică (SVI) estimat, pentru a prezice cel mai critic unghi de incidență al acțiunii seismice.

1.2 Descrierea modelului clădirii

Clădirea investigată este o structură din beton armat cu nouă niveluri situată în București, România. Modelul 3D al clădirii este prezentat în figura 1-1. Două secțiuni verticale longitudinale și transversale prin clădire și planurile nivelurilor curente și ale parterului sunt prezentate în figura 1-1. Înălțimea primului și a celui de-al doilea nivel este de 3,0 m, iar înălțimea celorlalte etaje este de 3,5 m. Înălțimea totală a clădirii este de 30,5 m. Clădirea are șapte travee în direcția X și două travee în direcția Y. Deschiderile sunt de 6 m în direcția X și de 3,7 m, respectiv 8,1 m în direcția Y. Dimensiunile secțiunilor transversale ale grinzilor sunt de 0,85 x 0,35 m pentru deschiderile de 8,1 m și 3,7 m (direcție transversală) și de 0,25 x 0,50 m pentru deschiderile de 6 m (direcție longitudinală). Sistemul structural este format din pereți structurali și cadre din beton armat, fiind încadrat ca sistem dual, conform configurației sale. Planșeele au o grosime de 0,20 m. Pentru pereți și stâlpi s-a folosit beton din clasa C30/37, iar pentru grinzi și planșee s-a folosit C25/30. Modulele de elasticitate corespunzătoare, E_{cm} , sunt de 33 GPa, respectiv 31 GPa (EN1992-1-1-1:2004, tabelul 3.1). Coeficientul lui Poisson, ν , a fost considerat egal cu zero, așa cum prevede EN1992-1-1-1:2004, aliniatul 3.1.3, pentru betonul fisurat. S-a utilizat oțel S500, clasa C. Structura a fost proiectată pentru clasa de ductilitate ridicată (DCH). Dimensiunile menționate au fost variate în conformitate cu rezultatele calculului clădirii. Aria totală a secțiunii transversale a pereților trebuie să satisfacă următoarea inegalitate pentru a reduce efectul forței tăietoare asupra pereților: $F_b/A_w \leq 2f_{ctd}$, unde: A_w este suprafața totală a pereților pe direcția forței seismice și f_{ctd} este rezistența de calcul la întindere a betonului [35]. S-a presupus că toți pereții au secțiuni transversale dreptunghiulare cu $b_w = 0,25\text{ m}$. Clădirea este clasificată ca fiind neregulată în plan conform criteriilor Eurocod 8. Factorul de comportare de bază, q_0 , este de 4,5 α/α_{u1} pentru DCH. Pentru tipul structural considerat, $k_w = 1$, iar

factorul α / α_{u1} este 1,1, astfel încât q corespunzător este de 4,95. Factorul de comportare q ($= q_0 k_w \geq 1,5$) în ambele direcții este egal cu 4,95. Analizele neliniare statice și dinamice au fost efectuate cu ajutorul programului de element finit SAP2000 [36]. În conformitate cu EN1998-1:2005, aliniatul 4.3.2, s-a presupus o excentricitate accidentală a maselor de 5 % din dimensiunile în plan ale clădirii în ambele direcții orizontale, pentru a lua în considerare incertitudinea în ceea ce privește poziția maselor. Clădirea investigată este caracterizată de un raport Ω (raportul dintre perioada proprie de translație, respectiv perioada proprie de rotație, pentru analiza elastică) în direcția X ($\Omega_x = 1,89$) și în direcția Y ($\Omega_y = 1,59$), $\Omega > 1$. În consecință, clădirea a fost considerată rigidă la torsiune, iar răspunsul predominant este modul de translație [12].

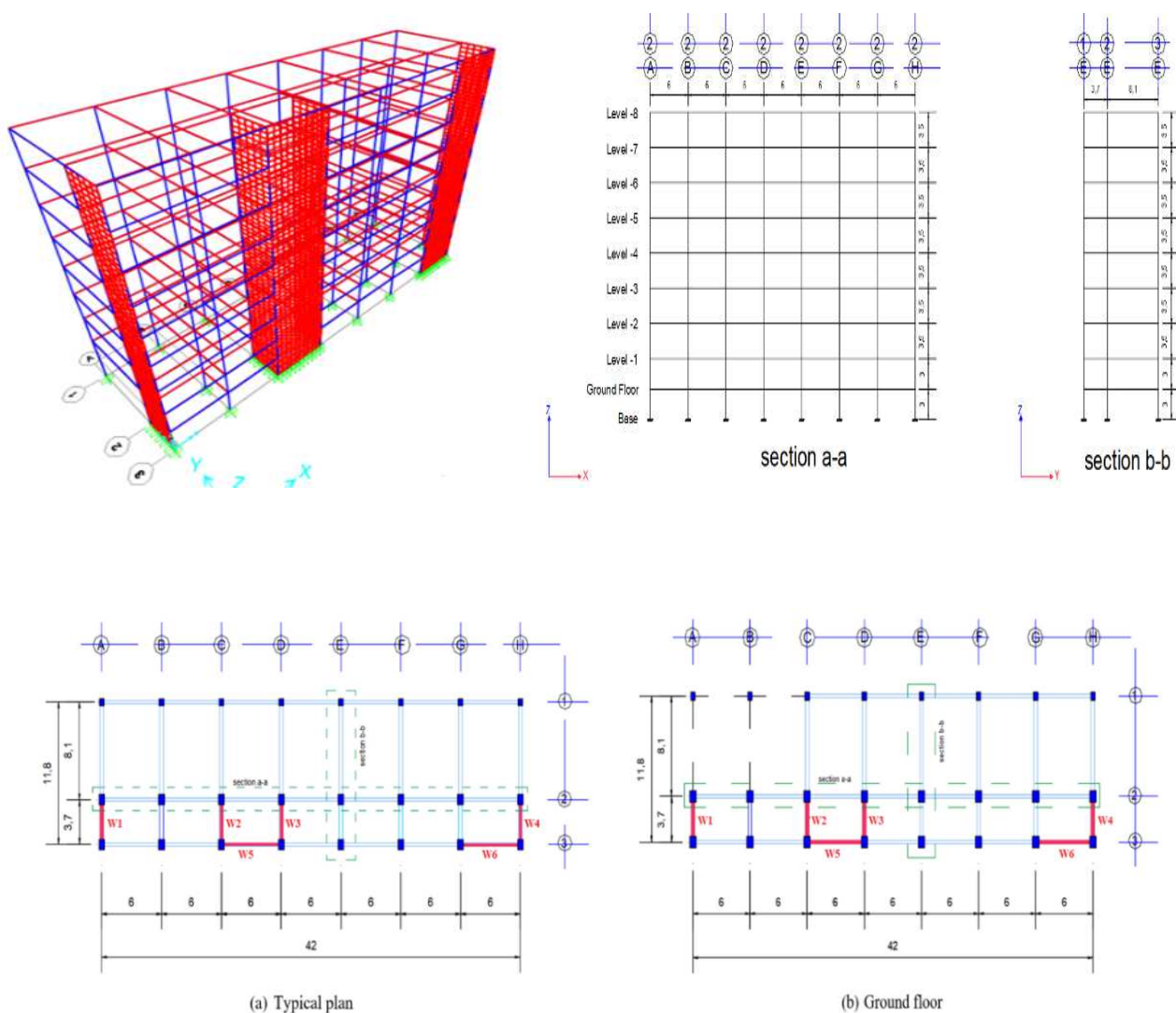


Figura 1-1. Model structural 3D, secțiuni verticale și planuri de etaj ale clădirii studiate (dimensiuni în m)

CAPITOLUL DOI

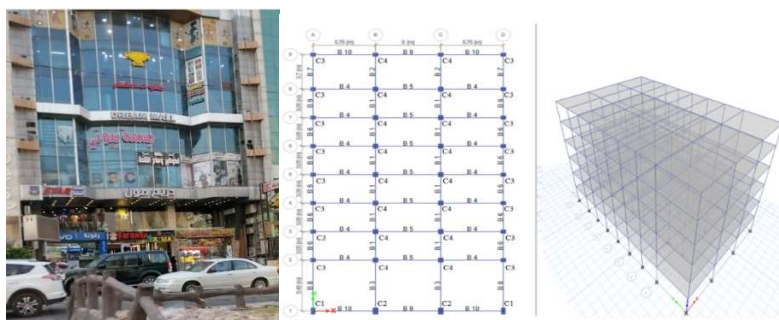
2 RĂSPUNSUL SEISMIC AL STRUCTURILOR DIN BETON ARMAT CU NEREGULARITĂȚI VERTICALE

2.1 Generalități

Cercetările anterioare privind structurile de înălțime medie cu retrageri (*setbacks*) la nivelurile superioare au investigat dacă analiza dinamică este importantă pentru proiectarea unor astfel de clădiri, deși mai multe coduri de proiectare (de exemplu, [1], [2] și [11]) recomandă deja metoda dinamică pentru analiza structurilor neregulate pe verticală. În prezent, ASCE 7-16/Secțiunea 12.2.3.2, permite utilizarea unei analize în două etape, bazate pe metoda forțelor laterale echivalente, pentru structurile care au o parte superioară flexibilă peste o parte inferioară rigidă. Pentru a obține o distribuție fezabilă a rigidității etajului pentru structurile superioare și inferioare, în studiul actual s-a aplicat o abordare simplificată de proiectare seismică, propusă în [13]. Această abordare a fost adoptată pentru a evita procedura de aproximații succesive bazată pe analiza dinamică. Scopul următorului studiu este de a evalua aplicabilitatea calculului prin metoda forțelor laterale echivalente în două etape, menționat mai sus, pentru structurile care au o parte superioară flexibilă peste o parte inferioară rigidă. În acest studiu, a fost investigat comportamentul seismic al diverselor structuri în cadre cu retrageri la nivelurile superioare, derivate pe baza unui tip de configurație structurală situată în Bagdad (Irak), utilizând abordarea propusă în [13]. S-a efectuat o verificare a IDR_a, parametrul driftului mediu obținut prin această abordare, și s-a făcut o comparație cu rezultatele analizei statice neliniare (NSP) și ale analizei dinamice neliniare (NDP). Suplimentar, au fost evaluate rapoartele de forfecare ale stâlpilor și indicele de vulnerabilitate (VI). Studiul de față aduce și o contribuție la evaluarea vulnerabilității seismice a clădirilor studiate, în care au fost determinate curbele de fragilitate dezvoltate în termeni de deplasări spectrale, pe baza procedurii de analiză statică neliniară (pushover), pentru a estima probabilitatea de avariere seismică. În plus, au fost studiate rapoartele de retragere (*setback ratios*) pentru a lua în considerare influența acestora asupra creșterii riscului de avariere.

2.2 Descrierea clădirilor studiate

Structurile în cadre din beton armat studiate, prezentate în figura 2-2, sunt modificate pe baza clădirii arhetipale din figura 2-1, prin introducerea unor retrageri la nivelurile superioare. Arhetipul structurilor cu cadre din beton armat este o construcție existentă din Bagdad. Clădirea are șase etaje deasupra nivelului solului (baza). Este o clădire de birouri, cu o configurație uniformă pe înălțime, construită în 2015. Înălțimea etajelor structurii inferioare și superioare este de 3,0 m, iar înălțimea totală a clădirii este de 18,0 m (GF+5S). Clădirea are 8 travee în direcția Y și 3 travee în direcția X. Deschiderile sunt de 5,75 m și 6,0 m în direcția X și de 3,7 m, 3,05 m și 5,45 m în direcția Y. Structurile în cadre studiate au aceeași configurație în plan ca și clădirea arhetipală la primele două etaje. S-a presupus că există pereți de umplutură din zidărie la aceste etaje, așa cum este descris în secțiunea 4.4, și pereți cortină din sticlă pentru etajele superioare, așa cum se arată în figura 2-2.



a. Imaginea clădirii

b. Modelul clădirii

Figura 2-1: Clădirea arhetipală

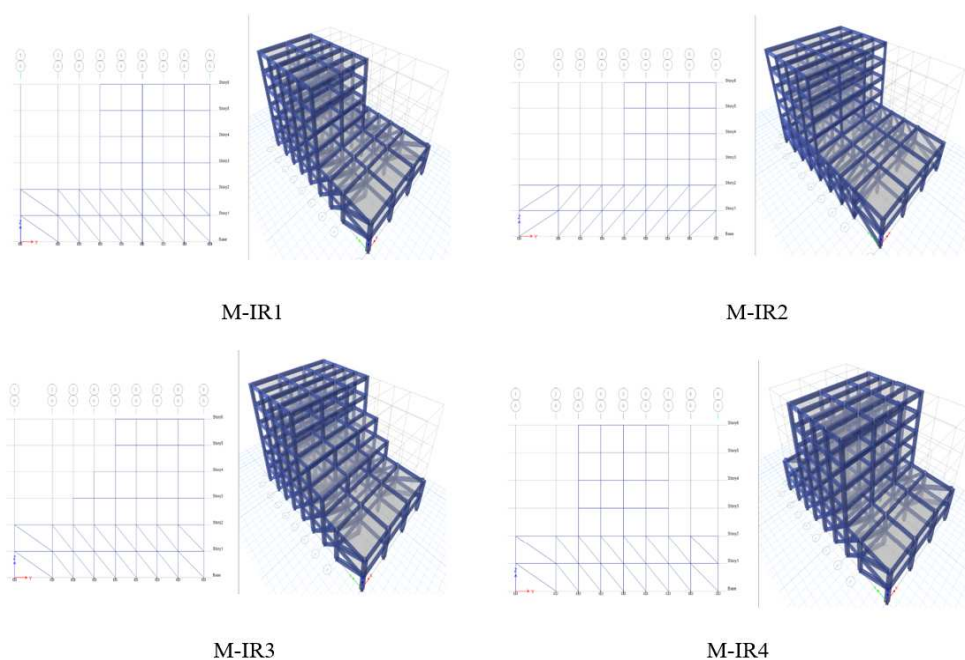


Figura 2-2: Geometriile structurilor din beton armat cu retrageri luate în considerare în studiul de față

2.3 Cuantificarea neregularității datorate retragerilor

Pentru a determina variația treptată a retragerilor pe înălțimea structurilor în cadre studiate și pentru a cuantifica neregularitatea datorată retragerilor, au fost calculați indicii de neregularitate ϕ_b și ϕ_s , propuși în [14]. Expresiile acestor parametri sunt conform ecuației 2.

$$\phi_b = f(z) = \frac{1}{nb-1} \sum_{i=1}^{nb-1} \frac{H_i}{H_{i+1}}, \quad \phi_s = f(z) = \frac{1}{ns-1} \sum_{i=1}^{ns-1} \frac{L_i}{L_{i+1}} \quad (2)$$

unde n_s este numărul de etaje, n_b este numărul de travee la nivelul 1, iar H_i și L_i sunt înălțimea și lățimea etajului i [49].

O valoare mare a indicelui ϕ_s corespunde unei reduceri mari a suprafeței nivelului. O valoare mare a indicelui ϕ_b corespunde unei structuri asemănătoare unui turn, în timp ce pentru situația extremă a unui cadru regulat fără retrageri, ambii indici de mai sus iau valoarea minimă, adică unitatea [14]. Cei doi indici sunt reprezentați în tabelul 2-3 pentru modelele studiate.

Tabelul 2-3. Neregularitatea geometrică pe verticală

Model nr.	Identificarea modelului	Y			X		
		ϕ_b	ϕ_s	ϕ_{avg}	ϕ_b	ϕ_s	ϕ_{avg}
1	M-IR1	1.286	1.139	1.212	4.500	1.116	2.808
2	M-IR2	1.286	1.128	1.207	-	-	-
3	M-IR3	1.040	1.135	1.088	-	-	-
4	M-IR4	1.286	1.125	1.206	-	-	-

CAPITOLUL TREI

3 CONCLUZII

Teza de față cuprinde două studii distincte, axate pe diferite tipuri de neregularități structurale. Primul studiu, dedicat neregularităților în plan, se concentrează pe investigarea aprofundată a comportamentului seismic al unui model-studiu de caz constând într-o clădire cu neregularități de plan, situată București (România), pe baza a diferite metode și punând în evidență vulnerabilitatea acesteia folosind diverse criterii. Al doilea studiu se ocupă de diferite tipuri de retrageri, derivate pe baza unei clădiri arhetipale din Bagdad (Irak), evaluând capacitatea diferitelor metode de analiză, utilizate la nivel internațional și în codul seismic irakian, de a reprezenta cu acuratețe comportamentul seismic al acestui tip de clădiri. Curbele de fragilitate sunt derivate pentru modelele studiate, iar influența neregularităților modelului asupra deplasărilor specifice fiecărei stări de avariere considerate este exprimată cu referire la aceiași parametri determinați pentru modelul regulat (arhetipal).

3.1 Concluzii rezultate din primul studiu de caz

3.1.1 Concluzii generale

Au fost efectuate analiza clădirii folosind metoda spectrului de răspuns liniar (RSA), analiza statică neliniară (pushover) și analiza dinamică neliniară THA. Din rezultatele analizei, s-au efectuat următoarele observații cu privire la suficiența proiectării conform Eurocodului 8 (EC8) a clădirii, aceasta fiind verificată prin utilizarea abordărilor statice și dinamice neliniare.

1. Clădirea are ductilitatea și suprarezistența necesare, suficiente pentru a justifica factorul de comportare $q=4,95$, utilizat în proiectare.
2. Pentru răspunsul global inelastic al clădirii, efectele de torsiune au fost evidente în valorile obținute din THA, comparativ cu cele obținute prin analizele pushover, în special în cazul marginii flexibile, FE, prin evaluarea efectelor modurilor de vibrație superioare și a torsiunii atât în elevație (deplasări relative de nivel), cât și în plan (deplasarea la ultimul nivel).
3. Valorile răspunsului local al clădirii în urma analizei elastice (RSA) în conformitate cu EC8 pentru eforturile interne (momente încovoietoare și forțe tăietoare) este mai mic decât cele rezultate din analizele de răspuns neliniar (pushover și THA).
4. Rezultatele patternului de încărcare modală au părut mai realiste decât rezultatele modelului de încărcare uniformă pentru clădirea prezentată, explicația rezidând cel mai probabil în faptul că răspunsul este guvernat de pereții structurali.
5. Compararea valorilor indicelui de vulnerabilitate seismică (SVI) pentru clădire a arătat rezultate acoperitoare; rezultatele THA au fost cu aproximativ 40% mai mici decât pentru modelul de încărcare modală pushover pentru direcțiile X+, X- și Y- și cu aproximativ 20% mai mici pentru direcția Y+. De asemenea, rezultatele THA au fost cu aproximativ 20% mai mici decât cele obținute folosind modelul de încărcare uniformă pushover în direcțiile X+ și X- și cu aproximativ (3%, 10%) mai mici în direcțiile Y+ și, respectiv, Y-.
6. Compararea valorilor forței tăietoare de bază pentru clădire a arătat rezultate acoperitoare; rezultatele THA au fost cu aproximativ (6%, 3%) mai mici decât cele obținute folosind modelul de încărcare modală pushover, în direcțiile X+, respectiv, X-. Rezultatele THA au fost mai mari

decât cele obținute prin utilizarea modelului de sarcină modală pushover cu aproximativ (2%, 17%) în direcțiile Y+ și, respectiv, Y-.

Din cele prezentate anterior, s-a relevat concluzia că structura din beton armat investigată, cu neregularitate în plan, proiectată conform Eurocodurilor (DCH), este eligibilă pentru a rezista atât la încărcările seismice de proiectare (conform P100-1/2013), ca și la accelerogramele unui cutremur compatibil (Irpinia cu magnitudinea 6,9, scalat pentru $PGA = 0,30 \text{ g}$ - specific pentru București) și la un set de accelerogramele simulate compatibile. Din comparația dintre analiza THA și analiza pushover, s-a constatat că, pentru răspunsul local sau global, analiza pushover aplicată nu este destul de eficientă, chiar dacă este mai puțin consumatoare de timp și mai puțin solicitantă din punct de vedere computațional. Rezultatele obținute, conservatoare, sunt mai puțin precise în comparație cu rezultatele THA. Pe baza acestor concluzii, s-a confirmat faptul că THA este mai bună decât analiza pushover pentru acest tip de clădire neregulată, cu dezavantajul de a fi mai solicitantă din punct de vedere al timpului de procesare pe calculator. În consecință, au fost efectuate studii suplimentare utilizând exclusiv THA, concluziile fiind raportate în secțiunea următoare.

3.1.2 Concluzii privind impactul unghiului de incidență al cutremurului asupra performanței seismice a clădirilor din beton armat plan-asimetrice

Clădirea studiată a fost analizată prin calcul dinamic nelinier de tip time-history (THA). Mai multe accelerograme au fost aplicate clădirii la opt unghiuri de incidență, variind de la 0° la 315° în incremente de 45° . Au fost utilizate șapte perechi de înregistrări seismice, totalizând în 14 accelerograme. Fiecare pereche a fost descompusă în componente după $(\bar{X})$ și $(\bar{Y})$. Pentru evaluarea influențelor direcționalității seismice, au fost combinați doi parametri de cerință, deplasarea maximă între niveluri (MLID) pe înălțimea clădirii și indicele de vulnerabilitate seismică (SVI), pentru a estima cel mai critic unghi de incidență. Din rezultatele analizelor, s-au obținut următoarele concluzii:

1. Pentru accelerogramele individuale, s-a observat că unghiul de incidență are un impact considerabil asupra cerinței seismice în termeni de MLID și SVI, ceea ce arată că răspunsurile depind nu numai de caracteristicile structurale, ci și de unghiul de incidență al acțiunii seismice.
2. Cele mai mari valori SVI au apărut la cel mai critic unghi de incidență, pentru fiecare mișcare a solului luată în considerare. Acest unghi este cel pentru care au fost obținute cele mai mari valori MLID în marginea flexibilă a clădirii (FE). Observația de mai sus, care se aplică tuturor accelerogramelor luate în considerare, arată influența FE asupra răspunsului structural global, în termeni de SVI.
3. Pe direcția Y, marginea rigidă (SE) și cea flexibilă (FE) au comutat între ele, pentru toate cele șapte accelerograme, la unghiurile de incidență $\beta=45^\circ$ și $\beta=225^\circ$. Pentru 5 din 7 accelerograme, comutarea a avut loc la $\beta=90^\circ$, pentru 4 din 7 accelerograme - la $\beta=270^\circ$, în timp ce pentru una din 7 accelerograme - la $\beta=180^\circ$. Acest lucru arată o variabilitate mare a unghiului critic și, de asemenea, că FE și SE pot comuta din cauza apariției aleatorii a plastificărilor, acest lucru depinzând, de asemenea, de caracteristicile mișcării terenului.

Din cele de mai sus, se poate concluziona că determinarea performanțelor seismice structurale și a avarierilor doar prin aplicarea accelerogramelor pe direcțiile principale ale structurii poate duce la evaluări inexacte. Combinația celor doi parametri de solicitare, deplasarea maximă între niveluri (MLID) pe înălțimea clădirii și indicele de vulnerabilitate seismică (SVI) estimat, a arătat importanța evaluării influenței FE și SE asupra cerințelor impuse structurii. Suplimentar, a fost evidențiată

dificultatea de a prevedea corect unghiurile critice de incidență atunci când se proiectează o clădire neregulată, având în vedere că răspunsul clădirii nu depinde numai de caracteristicile structurale, ci și de cele ale mișcării terenului. Acest lucru a fost evidențiat de unghiurile critice diferite la care au apărut cele mai mari valori SVI și MLID pentru diferitele mișcări ale terenului luate în considerare. Prin urmare, utilizarea unui număr suficient de accelerograme reprezentative bi-componentă pentru amplasamentul clădirii, precum și studiul detaliat al răspunsului seismic pentru diferite unghiuri de incidență sunt cu certitudine necesare pentru acest tip de clădiri.

3.2 Concluzii rezultate din cel de-al doilea studiu de caz

În acest studiu, răspunsul seismic al cadrelor din beton armat cu mai multe niveluri, cu diferite retrageri neregulate, proiectate pentru locațiile din Bagdad, este analizat prin trei metode diferite: metoda forței laterale echivalente, ELFP; metoda statică neliniară, NSP (cu trei distribuții solicitărilor pe înălțimea structurii) și metoda dinamică neliniară, NDP. Au fost investigați mai mulți parametri (și anume, deplasarea între etaje, indicele de vulnerabilitate locală (VI) și performanța seismică a elementelor structurale, măsurată prin coeficientul capacității la forță tăietoare, adică raportul dintre forța tăietoare din stâlp, V , și capacitatea de rezistență la forță tăietoare, V_n). Suplimentar, vulnerabilitatea clădirilor studiate a fost evaluată pe baza determinării curbelor de fragilitate. S-au efectuat următoarele observații.

1. Aplicabilitatea unei analize în două etape bazate pe metoda forțelor laterale echivalente (ELFP), pentru structuri care au o porțiune superioară flexibilă peste o porțiune inferioară rigidă (propusă în [47] ca o îmbunătățire a metodei din ASCE/SEI 7-16), a fost investigată prin verificarea deplasării relative de nivel (IDRa) obținut prin această abordare și prin compararea sa cu rezultatele analizei statice neliniare, NSP, și ale analizei dinamice neliniare, NDP. Din rezultatele obținute, s-a concluzionat că ELFP, care este adoptată în codul irakian ISC 2016 pentru analiza și proiectarea clădirilor din Irak, nu este adecvată pentru analiza structurilor cu retrageri la nivelurile superioare. În consecință, este urgentă necesitatea de a adopta metode adecvate și mai eficiente pentru proiectarea și evaluarea performanțelor clădirilor din beton armat - în special - deoarece acestea sunt cele mai utilizate în Irak.
2. Rezultatele obținute utilizând distribuția modală pentru NSP au arătat cea mai redusă capacitate la forță tăietoare țintă și cea mai mare cerință de deplasare țintă dintre cele trei modele de distribuție a solicitărilor laterale pe înălțime, luate în considerare în analiză. În consecință, acesta a fost considerat patternul critic de solicitare.
3. Compararea rezultatelor obținute pentru toate modelele utilizând NDP și NSP (schema de distribuție modală) a valorilor driftului între etaje și a raportului capacității la forță tăietoare pentru stâlpi a arătat că NSP nu este capabilă să simuleze impactul modurilor superioare asupra răspunsului structural, acesta devenind important atunci când crește neregularitatea structurii. Prin urmare, NDP este metoda adecvată pentru acest tip de clădire.
4. Este de remarcat faptul că raportul capacității la forță tăietoare pentru stâlpi, exprimat prin raportul dintre forța tăietoare din stâlp, V , și capacitatea de rezistență la forță tăietoare, V_n , a rămas mai mic de 1,0 (de fapt, nu a depășit 0,4), astfel încât performanța seismică a stâlpilor luați în considerare (selectând cei mai critici stâlpi din fiecare cadru) este satisfăcătoare.
5. Curbele de fragilitate pentru cele patru modele de retragere studiate au fost elaborate pe baza NSP, deși NDP este mai fiabilă și mai precisă. Cu toate acestea, evaluarea preliminară a clădirilor poate permite utilizarea unei metode simple precum NSP. Se poate observa că, atunci când gradul de neregularitate (al retragerilor pe înălțime) crește, riscul de avariere crește, iar modelele prezintă o

performanță seismică mai slabă. NSP a fost, de asemenea, utilizată în multe studii pentru a analiza clădirile neregulate. Cu toate acestea, având în vedere lipsa de informații despre avarierile provocate de cutremur, necesare pentru a calibra nivelurile de daune propuse de funcțiile de vulnerabilitate, fiabilitatea acestor funcții rămâne deocamdată o chestiune critică.

6. Curbele de fragilitate dezvoltate în acest studiu ar putea fi utilizate ca investigație preliminară în scenariile de risc seismic din Irak (Bagdad) pentru clădirile cu retrageri pe înălțime (neregularități pe verticală). Se consideră necesară prelucrarea ulterioară a acestor curbe pentru a ține cont de contrastul potențial al parametrilor de intrare, care sunt selectați pentru analiza neliniară, determinarea pragurilor stărilor de avariere, și de ipotezele care au fost utilizate pentru curbele de fragilitate aferente fiecăreia dintre stările de avariere considerate.
7. Pe măsură ce crește nivelul de neregularitate (retragere) al modelului, capacitățile de forfecare și deplasările țintă scad, sub efectul celor trei patternuri de încărcare utilizate pentru NSP. Acest lucru se datorează scăderii capacității structurii.
8. Severitatea sau gradul de retragere a modelelor influențează, de asemenea, creșterea avarierilor, gradele de retragere fiind studiate pentru a ține cont de severitatea acestora. Forțele sunt concentrate pe secțiunea structurii în care are loc scăderea bruscă a rigidității, adică în partea inferioară a structurii superioare. Acest lucru poate fi observat din dezvoltarea articulațiilor plastice în această zonă. În consecință, se consideră că modificarea bruscă a rigidității sau configurațiile verticale neregulate ale structurilor reprezintă locații de vulnerabilitate locală.