

M i n i s t e r u l E d u c a ț i e i N a ț i o n a l e

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

Teză de Doctorat

**STUDIUL COMPORTĂRII NELINIARE A
STRUCTURILOR ȘI ECHIPAMENTELOR
CENTRALELOR NUCLEARE**

Doctorand:

Ing. Florin KÖPE

Conducător științific:

Prof. Univ. Dr. Ing. Valeriu BĂNUȚ

București, 2013

CUPRINS

Capitolul 1: Introducere

Capitolul 2: Aspecte generale privind calculul structurilor și echipamentelor nucleare

- 2.1 Acțiuni
- 2.2 Probabilitatea de cedare și determinarea rațională a cerințelor de proiectare
- 2.3 Încărcări tipice pentru centrale nuclear-energetice
- 2.4 Reglementări aplicabile
- 2.5 Metode generale de analiză
- 2.6 Criterii de acceptare
- 2.7 Categoriile de tensiuni

Capitolul 3: Evaluarea probabilistică a riscului seismic

- 3.1 Hazard Seismic
- 3.2 Fragilitate seismică
- 3.3 Risc seismic

Capitolul 4: Aplicații de calcul nelinier pentru structuri și echipamente nucleare

- 4.1 Analiza neliniară a structurilor prin metoda elementului finit
- 4.2 Analiza dinamică neliniară a sistemelor și structurilor
- 4.3 Cupola inferioară a anvelopei reactorului tip CANDU
- 4.4 Clădirea electrică a unui reactor PWR
- 4.5 Analiza impactului containerului de transfer combustibil uzat
- 4.6 Analiza unui rezervor de tip MSR (separator/supraîncălzitor)
- 4.7 Evaluarea seismică a sistemelor de conducte sau canale îngropate
- 4.8 Analiza potențialului de lichefiere a pământului

Capitolul 5: Determinarea riscului seismic considerând moduri de cedare multiple

- 5.1 Alternative pentru descrierea excitației seismice și determinarea cerinței
- 5.2 Analiza probabilistică cu element finit (SFEM)
- 5.3 Fiabilitatea sistemului
- 5.4 Exemplu de calcul pentru determinarea fragilității multimodale pentru o clădire D+P+14

Capitolul 6: Concluzii

Bibliografie
Index

ANEXE

- Anexa A: Aproximarea hazardului de drift funcție de hazardul seismic
- Anexa B: Repartiții statistice utilizate în analiza probabilistică a hazardului seismic
- Anexa C: Concepte relevante de teoria probabilităților și statistică
- Anexa D: “Fișă de evaluare seismică” utilizată la inspecția centralei

Capitolul 1

INTRODUCERE

Cerințele de proiectare pentru unitățile nucleare au urmat un curs paralel cu proiectarea convențională pentru construcții civile până la începutul anilor '60. După această dată reglementările în domeniu au devenit tot mai specifice și detaliate. De la această dată au luat ființă o serie de organisme de reglementare (ex. Nuclear Regulatory Commission – NRC, etc). Criteriile de proiectare elaborate de aceste organizații aveau la bază pe lângă cerințele aplicabile construcțiilor civile, și considerarea explicită a încărcărilor extreme (tornade, seism, etc.) precum și diferite alte prevederi specifice pentru anvelopele de beton armat sau pentru sistemele de înaltă presiune critice pentru securitatea nucleară.

Cerințele specializate de proiectare structurală și analiză sunt aplicabile “sistemelor și componentelor de clasă nucleară”, clasificate prin intermediul codurilor ASME (ASME 1983) și standardelor ANS, de ex. (ANS 2008). Restul componentelor intră sub jurisdicția normelor de proiectare convențională. Multe dintre centralele nucleare în operare (inclusiv unitățile de tip CANDU construite în România) sunt proiectate și licențiate în mare parte în baza codurilor de origine SUA.

În mod tradițional centralele nuclear-energetice au fost proiectate construite și operate în principal utilizând filozofia analizei de siguranță deterministică. Experiența a arătat că se pot produce accidente care ies din cadrul tradițional de proiectare (de ex. avarii multiple la TMI-2, sau accident din evenimente externe de tip incendiu Browns Ferry). Astfel, pentru a găsi soluții în cazul unor asemenea scenarii este necesară o abordare diferită. Evaluarea probabilistică a securității (PRA) reprezintă o alternativă ce poate răspunde la identificarea scenariilor de accident care apar ca rezultat al unui număr variat de evenimente inițiatoare.

Evaluarea probabilistică a riscului poate fi realizată în trei niveluri de complexitate. Nivelul 1 îl reprezintă nivelul inițial și fundația PRA. Acest nivel furnizează o evaluare a proiectării și operării centralei concentrându-se pe acele scenarii de accident care pot produce avaria zonei active a reactorului. Nivelul 2 cuantifică mărimea și frecvența anuală de emisii radioactive în mediul înconjurător ca urmare a avariei zonei active și cedarea anvelopei. În cadrul nivelului 3 se evaluează frecvența anuală și mărimea consecințelor expunerii radiologice a populației și mediului considerând condițiile meteorologice, topografie, date demografice, diverse modele de emisii radioactive și dispersii.

Capitolul 2

ASPECTE GENERALE PRIVIND CALCULUL STRUCTURILOR ȘI ECHIPAMENTELOR NUCLEARE

Cerințele de proiectare structurală pentru centralele nucleare au un grad ridicat de particularitate. În nici un alt sistem structural încărcări extreme cum ar fi tornade, solicitări seismice superioare oricăror intensități identificate istoric și alte solicitări accidentale evaluate corespunzător unei probabilități 10^{-7} , nu sunt considerate explicit în proiectare. Considerarea acestor încărcări extreme corespunzătoare unor probabilități de apariție atât de reduse este justificată de consecințele potențiale ale modurilor de cedare

structurală. Ca urmare, o gamă mult mai largă de încărcări extreme este considerată în proiectarea centralelor nucleare prin comparație cu construcțiile civile obișnuite.

Probabilitatea de cedare a jucat un rol cheie în proiectarea centralelor nucleare. Poate cel mai important rol al său a fost în domeniul procesului decizional privind proiectarea la încărcări extreme. Ca urmare un grad mare de atenție a fost acordat considerării evaluării probabilității de cedare ca instrument în dezvoltarea cerințelor de proiectare seismică și la solicitari din tornade.

Reglementările aplicabile SUA au fost agumentate și însușite de diverși producători de centrale nucleare. Unitățile CANDU construite în România, de exemplu, sunt licențiate în mare măsură prin aplicarea codurilor ASME. Acest standard furnizează reguli de proiectare, fabricare și inspecție pentru cazane și recipiente sub presiune. Codul are 12 secțiuni, cu Secțiunea III aplicabilă construcției de componente pentru centrale nucleare. Această secțiune are la rândul ei un număr de subsecțiuni care tratează pe rând componentele asociate diverselor niveluri de clasă nucleară, de exemplu "Division 2" stabilește prevederi tipice anvelopelor de beton armat ș.a.m.d.

Delimitarea între diferite categorii de tensiuni reprezintă o altă particularitate importantă în abordarea proiectării centralelor nucleare în comparație cu clădirile civile obișnuite. Mecanica solidelor definește trei categorii de bază pentru tensiuni: primare, secundare și de vârf. În proiectarea structurilor obișnuite distincția între diverse categorii de eforturi unitare este rareori făcută din moment ce efecte termice semnificative ce dau naștere în mod uzual tensiunilor secundare sau de vârf care la rândul lor pot induce cedarea prin oboseală după un număr redus de cicluri sunt ocazional întâlnite.

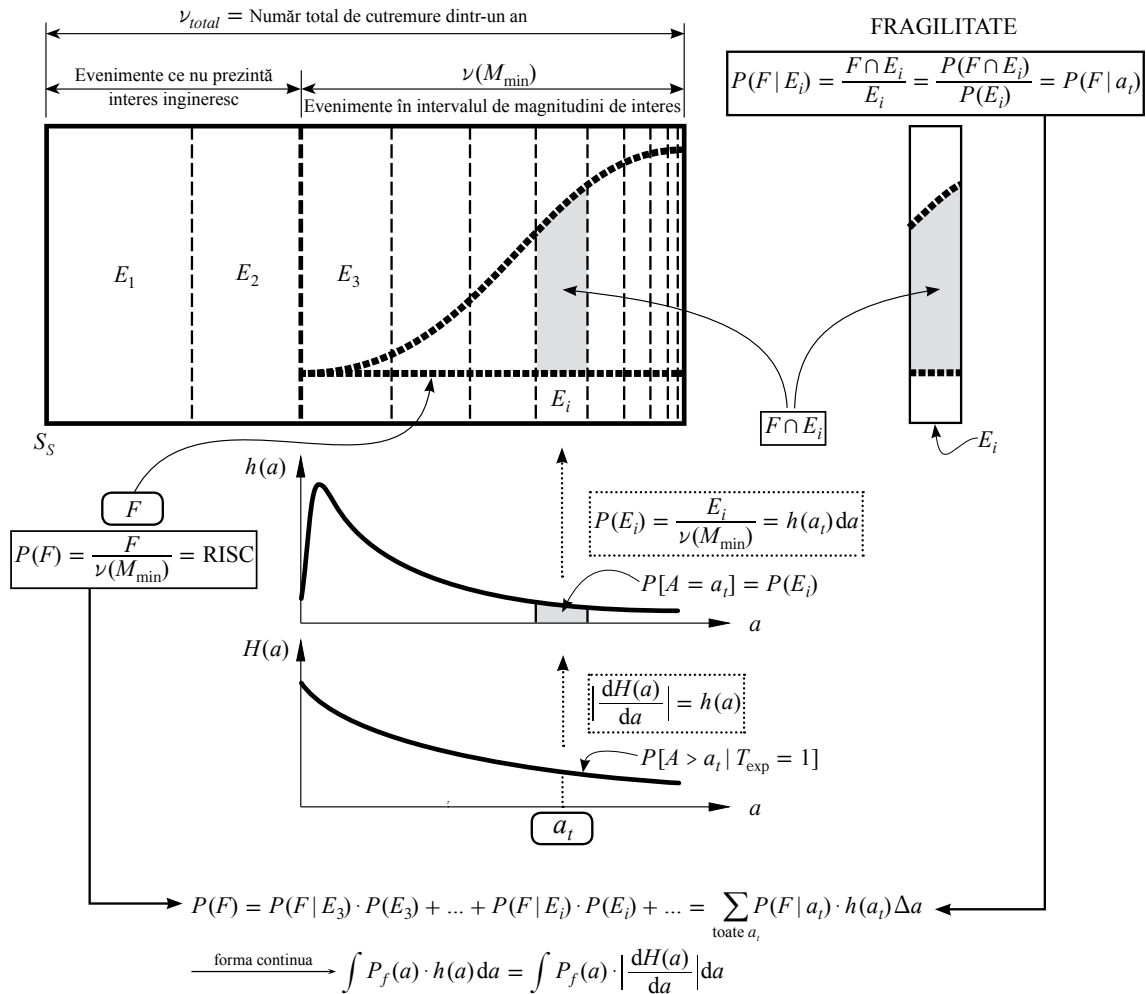
Capitolul 3

EVALUAREA PROBABILISTICĂ A RISCULUI SEISMIC

Scopul principal al evaluării probabilistice îl reprezintă determinarea distribuției de probabilitate a frecvenței de apariție a unor consecințe adverse (de ex. avaria zonei active (miezului) a reactorului prin topirea combustibilului, emisii radioactive și alte consecințe radiologice produse în exteriorul amplasamentului). Aceste efecte pot fi cuantificate în particular doar pentru evenimente de tip cutremur și atunci analiza poartă denumirea de analiză probabilistică a riscului seismic.

Evaluările probabilistice de risc sunt proiecte complexe și implică un efort considerabil atât de analiză cât și de timp. Pot fi efectuate atât în faza de proiectare cât și ulterior în timpul funcționării centralei.

Figura următoare ilustrează modalitatea de determinare a riscului seismic. Totalitatea evenimentelor E_i alcătuiesc câmpul de evenimente S_S . Evenimentele care sunt asociate unui magnitudini mai mici de M_{\min} de exemplu $M_{\min}=5$ nu sunt considerate la determinarea riscului întrucât nu generează mișcări seismice cu contribuție semnificativă la probabilitatea de cedare. Având hazardul și fragilitatea seismică determinate se urmărește calcularea probabilității necondiționate de cedare $P(F)$ (sau probabilitatea totală de cedare) – probabilitate care nu depinde mai departe de un alt parametru. Această probabilitate reprezintă chiar riscul seismic.



Aplicarea teoremei probabilității totale pentru determinarea riscului

Elementele cheie ale unei evaluări probabilistice de risc seismic sunt:

- Analiza de hazard seismic (determinarea probabilității de apariție a mișcării seismice de diferite intensități în amplasament, caracterizată printr-un parametru de hazard convenabil ales i.e.: accelerație spectrală, accelerația de vârf a terenului, etc.)
- Evaluarea fragilităților seismice (determinarea probabilității de cedare condiționate funcție de parametrul de hazard) a echipamentelor și structurilor importante a căror cedare poate conduce la o avarie inacceptabilă a centralei (de. ex: topire combustibilului din zona activă a reactorului). Inspecția centralei este o activitate importantă în realizarea acestei sarcini.
- Analiza secvenței de accident și a sistemelor (presupune modelarea combinațiilor posibile de cedare a echipamentelor și structurilor ce pot iniția și mai apoi propaga o secvență de avarie seismică a zonei active a reactorului)
- Cuantificarea riscului: constă în asamblarea rezultatelor analizei de hazard seismic, fragilității și analizei sistemelor/secvențelor de accident pentru a estima frecvența de avarie a miezului și alte stări de avarie ale centralei. Evaluarea impactului evenimentelor de tip seismic asupra anvelopei

reactorului și analiza urmărilor accidentului, integrarea acestor rezultate cu analiza de topire de miez în vederea estimării riscului seismic prin efectele asupra sănătății populației. (ex. pierderi imediate, victime cu cancer latent)

Analizele probabilistice de risc seismic (*SPRA*) au fost efectuate inițial pentru a răspunde preocupărilor legate de securitate în zonele intens populate. *SPRA* se folosește ca instrument de evaluare în cazul centralelor în operare ce nu au fost proiectate și construite în conformitate cu standardele curente pentru a identifica eventuale probleme legate de siguranță asociate extinderii duratei de funcționare.

Capitolul 4

APLICAȚII DE CALCUL NELINIAR PENTRU STRUCTURI ȘI ECHIPAMENTE NUCLEARE

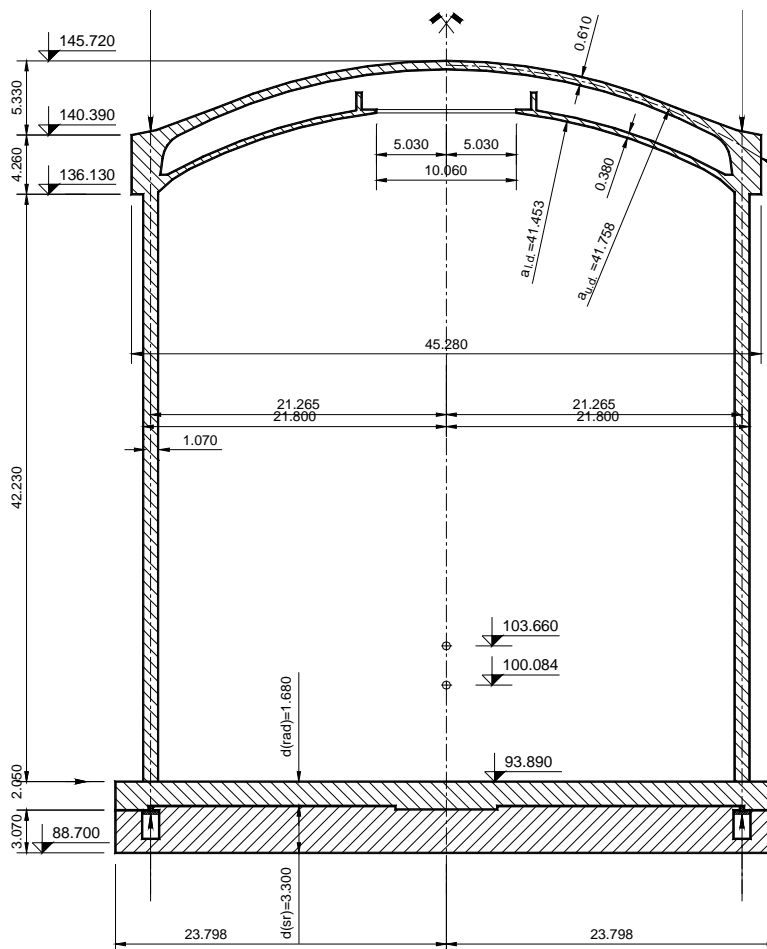
Acest capitol prezintă succint fundamentele teoretice relevante exemplor de calcul neliniar selectate pentru prezentare ulterioară. Analiza cu element finit nu este prezentată în amănunt întrucât este o procedură ajunsă la maturitate, iar un mare număr de lucrări de referință prezintă în detaliu toate aspectele importante ale acestei metodologii. Exemplele selectate pentru prezentare în acest capitol sunt aplicații referitoare la calculul static cât și dinamic neliniar al structurilor și echipamentelor centralelor nucleare.

Cupola inferioară a anvelopei reactorului tip CANDU

Anvelopa adăpostește reactorul nuclear. Radierul, peretele perimetral grinda inelară și cupola superioară alcătuiesc anvelopa clădirii reactorului. Fiecare din aceste componente este alcătuită din beton armat precomprimat pentru a asigura cerința de siguranță la scurgeri accidentale. Cupola inferioară este folosită ca rezervor pentru sistemul de stropire, nu este parte din anvelopă și este alcătuită din beton armat.

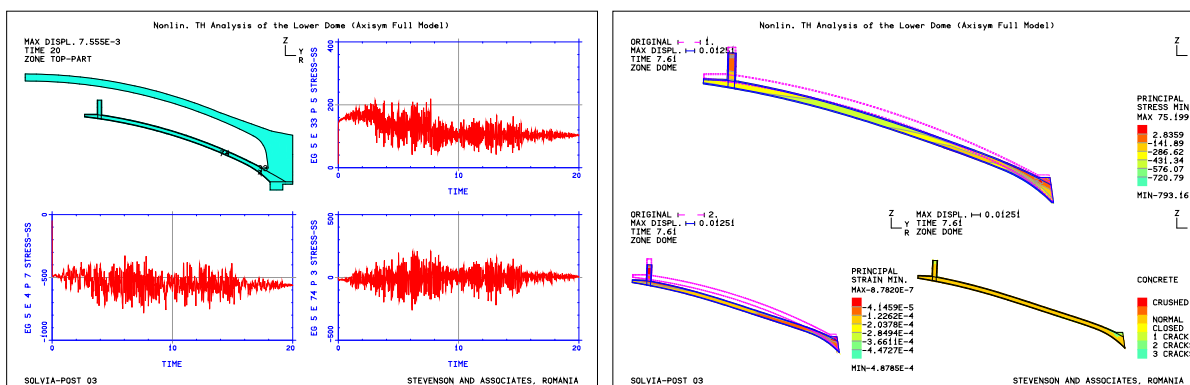
Radierul este așezat pe un subradier alcătuit din beton armat. O membrană de glisare este prevăzută între cele două plăci pentru a permite deplasarea independent radială a radierului sub încărcările de precomprimare și contracție. Un pinten central pentru forță tăietoare și un set de blocaje radiale asigură stabilitatea necesară la solicitări seismice.

Pentru determinarea capacității seismice a cupolei inferioare, s-a efectuat o analiză dinamică neliniară. S-a utilizat integrarea directă prin metoda Newmark pentru rezolvarea ecuației de mișcare, iar iterarea în cadrul fiecărui pas de timp s-a făcut utilizând metoda Newton pentru căutarea soluției de echilibru. Analiza a fost efectuată prin determinarea inițială a configurației de tensiuni și deformații obținută prin analiza statică corespunzătoare tensiunilor și deformațiilor induse de greutatea clădirii reactorului, apa și structura de susținere tributară sistemului de stropire. Analiza dinamică a fost efectuată prin utilizarea condiției de restart de la configurația statică determinată anterior. Fragilitatea structurii a fost determinată utilizând metoda EPRI.



Structura principală a clădirii reactorului de tip CANDU

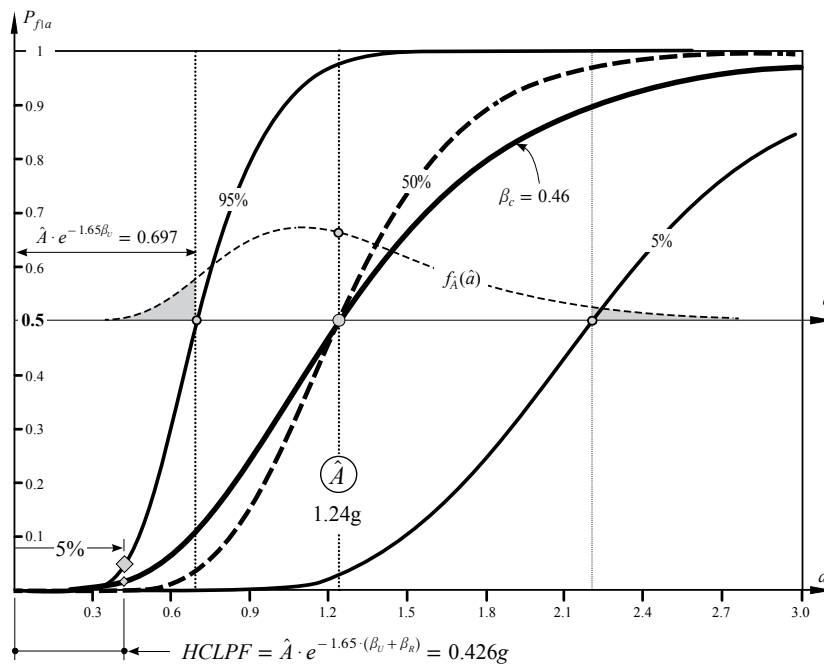
Răspunsul în deplasări în punctele selectate pentru verificare cât și răspunsul în tensiuni meridionale sunt prezentate mai jos. Valoarea maximă înregistrată în beton datorită efectelor combinate de încărcare proprie, apa din rezervorul cupolei inferioare, structura sistemului de stropire și acțiunea seismică este de 7.93 MPa.



Răspunsul în eforturi unitare meridionale [tf/m^2] în punctele selectate pentru verificare (stânga). Tensiunile [tf/m^2] și deformațiile specifice minime (dreapta) și starea de fisurare a betonului considerând excitația seismică, greutatea clădirii reactorului și rezervorul plin

Accelația mediană capabilă determinată pentru cupola inferioară este 1.24g abaterile standard logaritmice β_U respectiv β_R pentru incertitudinile epistemice respectiv aleatoare sunt considerate 0.35 respectiv 0.3.

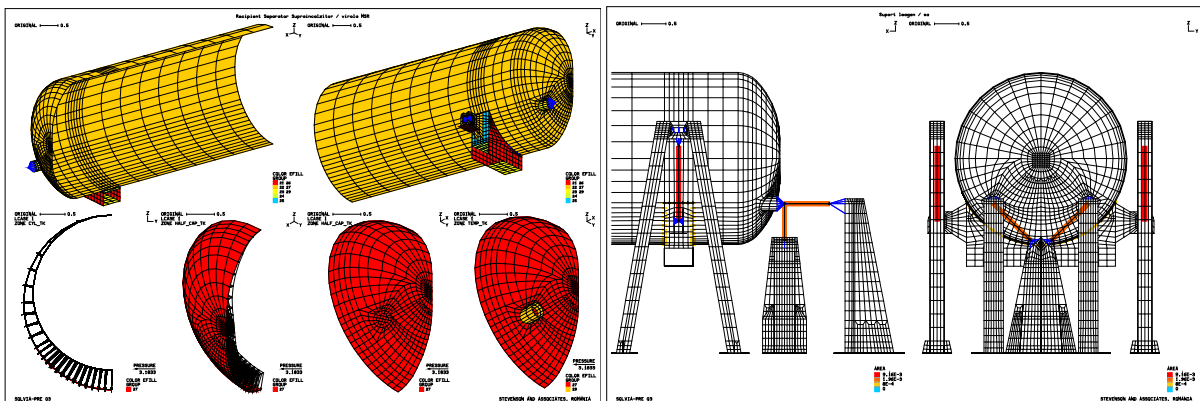
Probabilitatea de cedare a fost obținută conform metodologiei (EPRI 1994) cu relația $HCLPF = \hat{A} \cdot e^{-1.65(\beta_R + \beta_U)}$. Reprezentarea probabilității de cedare de 5% asociată nivelului 95% de încredere ($HCLPF$) este ilustrată în figura următoare.



Curbele de fragilitate și HCLPF pentru cupola inferioară a clădirii reactorului

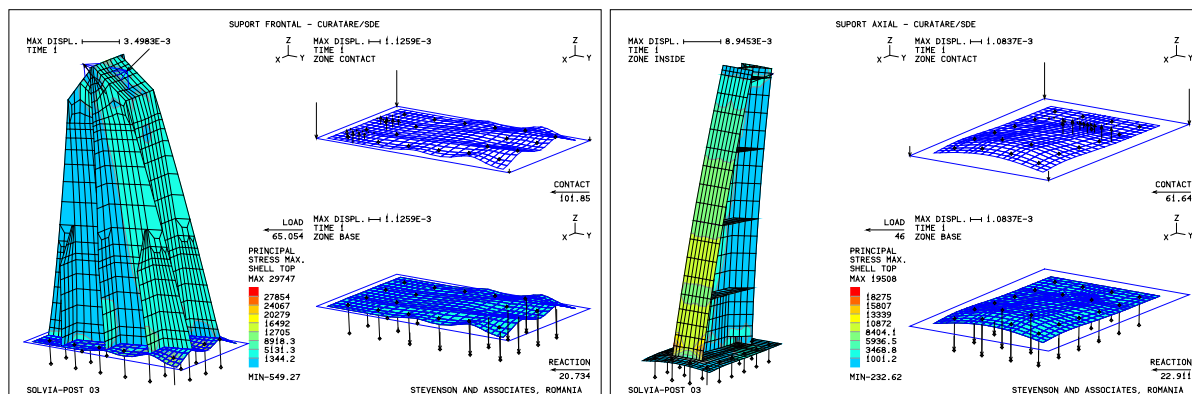
Analiza unui rezervor de tip MSR

Analiza de tensiuni a recipientului și a suporturilor sale a fost efectuată pe baza unui model de calcul elaborat prin dezvoltarea detaliată a suporturilor frontali, axiali și a celor de susținere. Dezvoltarea detaliată a modelului a făcut posibilă obținerea distribuției de tensiuni în reperle componentelor suporturilor cât și în mantaua recipientului.



Modelul virolei și poziția amortizorilor seismici și de șoc

Verificarea ancorajelor suporturilor MSR s-a făcut printr-un calcul nelinier static, neliniaritatea provenind din condițiile de contact stabilite între placa de bază a suportului și planșeu



Forțe în ancorajul suporturilor

Capitolul 5

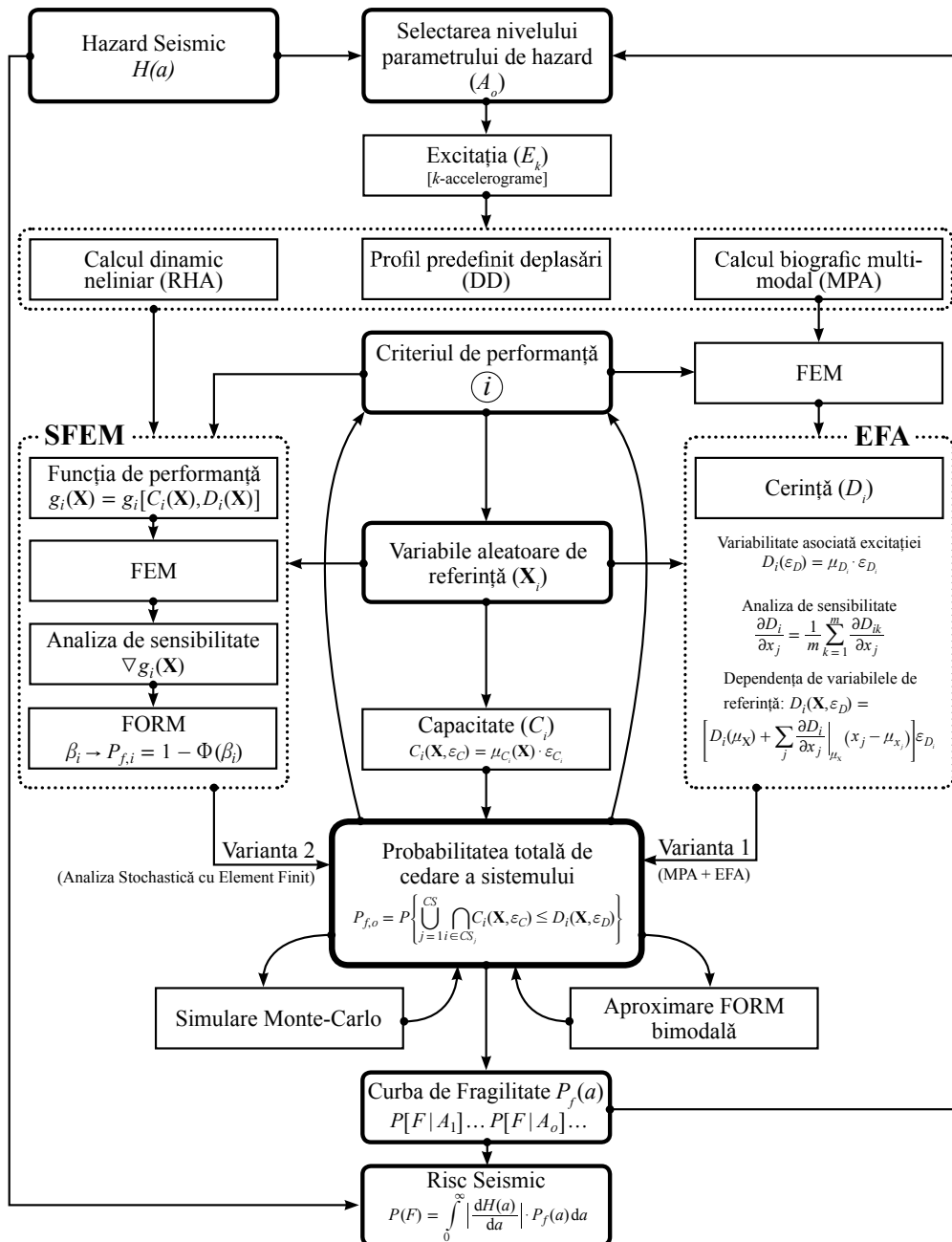
DETERMINAREA RISCULUI SEISMIC CONSIDERÂND MODURI DE CEDARE MULTIPLE

Colapsul unui sistem structural este un fenomen complex și nu întotdeauna poate fi caracterizat complet printr-un singur mod de cedare. În practică apar deseori situații în care diverse moduri de cedare (încovoiere, forfecare, deformare specifică, deplasarea relativă de nivel, etc) având contribuții apropiate de același ordin de mărime la evaluarea frecvenței medii anuale (risc) de cedare a sistemului analizat, guvernează colapsul general, și mai mult acesta poate fi inițiat simultan în diferite elemente ale structurii.

Cazul particular al modurilor de cedare înseriate (aparitia oricărui eveniment conduce la colaps) nu acoperă toate situațiile întâlnite în practică, dar oferă prin aproximări raționale estimări acceptabile asupra riscului.

Acest capitol prezintă o metodă *practică* pentru determinarea fragilităților sistemelor generale și mai apoi prin integrare cu hazardul seismic, conduce la determinarea riscului. Elementele principale care alcătuiesc acest procedeu corespund în principal cadrului general de determinare a riscului, prezentat în capitolul 3. Figura următoare prezintă schematic două alternative pentru determinarea riscului seismic.

Metoda are la bază evaluarea eficientă a fiabilității prin simulare Monte-Carlo întrucât nu necesită reluarea analizei structurale. Metodele analitice pentru evaluarea fiabilității unui sistem general aproximează oricum rezultatul final prin intermediul furnizării a două limite (superioară și inferioară). Metoda Monte-Carlo poate fi aplicată după obținerea caracterizării statistice a variabilelor aleatoare implicate și identificarea corespunzătoare a seturilor coincidente (*en*: cut-sets) minimale.

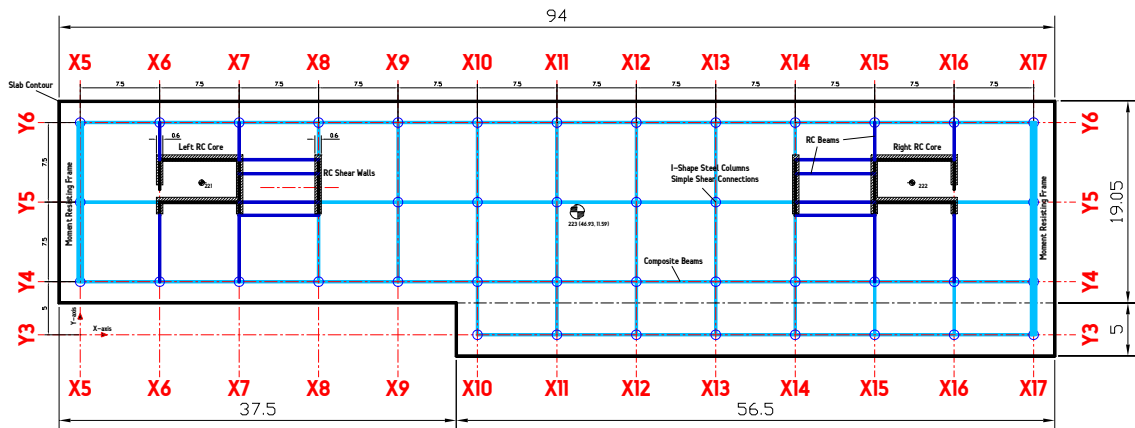


Alternative pentru determinarea riscului seismic al unui sistem structural cu multiple moduri de cedare.

Exemplu de calcul pentru determinarea fragilității multimodale pentru o clădire D+P+I4

Fragilitățile sunt determinate aplicând metoda prezentată în figura anterioară utilizând MPA și EFA. Criteriile de performanță considerate pentru determinarea fragilității sunt asociate:

- Depășirii capacității la forță tăietoare verificată la baza nucleelor, V_b ;
- Depășirii deformației specifice maxime de compresiune a betonului ε_{cu} la baza nucleelor;
- Depășirii capacității de deformație a grinzilor adiacente nucleelor de beton armat prin ductilitatea de curbură $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$ urmărită la capătul conectat cu nucleul



Planșeu curent structură D+P+14. Dispunere elemente structurale.

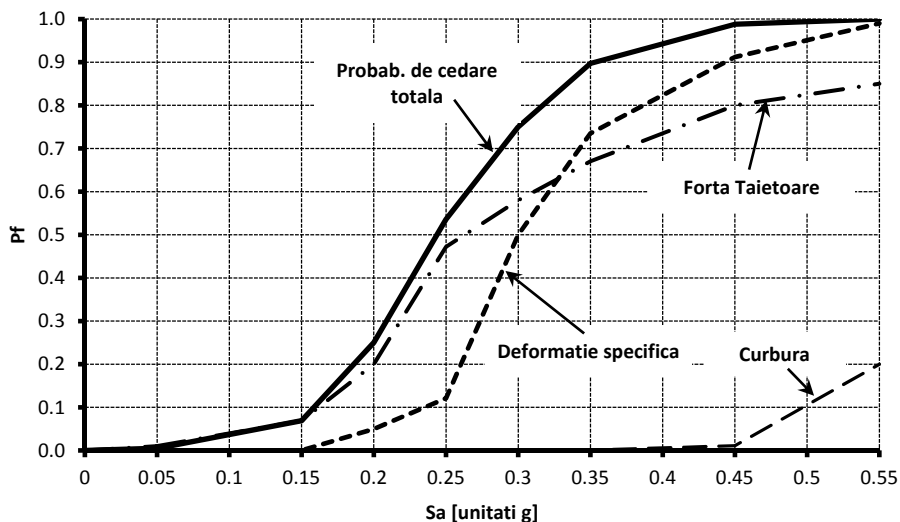
Pentru determinarea fiabilității s-a efectuat câte o analiză Monte Carlo pentru fiecare mod de cedare în parte, caracterizat prin funcția de performanță $g_i(\mathbf{X}, \varepsilon) = C_i(\mathbf{X}, \varepsilon_{C_i}) \leq D_i(\mathbf{X}, \varepsilon_{D_i})$. S-au realizat 15000 de experimente pentru fiecare mod de cedare în parte. Probabilitățile de cedare individuale au fost mai apoi

combinat utilizând relația $P_f = P \left\{ \bigcup_{j=1}^{CS} \bigcap_{i \in CS_j} C_i(\mathbf{X}, \varepsilon_{C_i}) \leq D_i(\mathbf{X}, \varepsilon_{D_i}) \right\}$. Relația a fost aplicată

considerând că fiabilitatea structurii este caracterizată de 3 cut-seturi minimale, fiecare în parte corespunzător unui mod de cedare evaluat anterior, astfel:

- CS_1 – Deformația specifică maximă la baza nucleelor de beton armat
- CS_2 – Forță tăietoare capabilă la baza nucleelor de beton armat
- CS_3 – Capacitatea de rotire a grinzilor la îmbinarea cu nucleul central

Curba de fragilitate totală cât și separat pe componente este prezentată în figura următoare:



Curba de fragilitate pentru întreg sistemul și separat pe componente

Capitolul 6

CONCLUZII

Lucrarea prezintă studiul comportării neliniare a structurilor și echipamentelor centralelor nucleare din perspectiva evaluării probabilistice a riscului seismic. Această abordare într-un cadru mai larg a fost considerat utilă întrucât nivelul de complexitate regăsit în diferite analize neliniare efectuate pe sisteme structurale întâlnite în centrale nucleare este impus de un număr de factori strâns legați de nivelul de detaliere al analizei probabilistice de risc (PRA) cât și de nivelul contribuției la probabilitatea anuală (frecvența) de topire a combustibilului din zona activă.

Întreaga teză este astfel structurată încât să prezinte concis elementele cheie necesare realizării unei analize probabilistice a riscului seismic (SPRA), și anume: 1) identificarea corectă a acțiunilor, 2) elaborarea hazardului seismic, 3) determinarea fragilităților, și 4) calculul riscului.

Conținutul principal al lucrării îl constituie *capitolul 4* unde sunt prezentate analiza neliniară și fragilitățile seismice ale unui număr de structuri și echipamente întâlnite în centralele nuclear-energetice, și *capitolul 5* în care se propune o metodologie pentru determinarea riscului utilizând moduri multiple de cedare asociate aceluiași sistem structural.

O prezentare succintă a elementelor importante abordate în teză este redată în continuare:

- Aproximarea capacității anvelopei unui reactor CANDU prin evaluarea modului de cedare al îmbinării cupolei inferioare în peretele perimetral precomprimat și evaluarea probabilității de cedare de 5% asociată nivelului de încredere de 95% (HCLPF). S-a considerat o armare radială discretă și comportare neliniară de material într-un model axial-simetric cu elemente finite de tip solid în stare plană de deformații.
- Evaluarea comparativă a capacității clădirii electrice dintr-o centrală nucleară tip PWR prin trei metode de tip pushover. S-a determinat atât fragilitatea seismică cât și HCLPF. Capacitatea a fost aproximată din reprezentarea răspunsului clădirii prin intermediul unui singur perete structural de beton armat având aplicate corecții cu resoarte elasto-plastice la nivelul planșelor pentru asigurarea compatibilității deplasărilor relative de nivel cu întreaga clădire. S-a considerat atât armarea discretă în jurul golurilor cât și cea uniformă orizontală și verticală din perete, iar modelul a fost dezvoltat considerând o comportare neliniară de material atât pentru armătură cât și pentru beton. Rezultatele analizei indică faptul că metoda de corecție a cerinței de deplasare la nivelul acoperișului (FEMA-356) conduce la valoarea cea mai mică a cerinței, iar liniarizarea echivalentă (ATC-55) oferă soluția cea mai acoperitoare. Metodele bazate pe spectrele de ductilitate constantă furnizează valori intermediare ale cerinței de deplasare la nivelul acoperișului între cele două proceduri menționate anterior.
- Aplicarea analizei de contact pentru evaluarea aproximativă a deformațiilor rezultate în containerul de transfer combustibil uzat la ciocnirea cu platforma bazinului și determinarea realistă a tensiunilor din ancoraje și virola unui recipient amplasat la înălțime în clădirea turbinei.

- Validarea procedurilor de calcul simplificat prin modele de calcul cu element finit sau rutine specializate pentru sisteme de conducte îngropate și lichefierea pământului.
- Procedură de determinare a fragilităților seismice considerând moduri de cedare multiple. Metoda propusă se bazează pe determinarea cerinței printr-un calcul static neliniar biografic multimodal (MPA) cu considerarea torsiunii generale. Variabilitatea cerinței este introdusă prin reluarea analizei pentru un număr de accelerograme selectate din baza de date (PEER 2013) pe criteriul conținutului de frecvențe similar în domeniul de interes delimitat de modurile proprii considerate. Modurile de cedare sunt caracterizate prin intermediul unui număr redus de variabile aleatoare de referință comune atât cerinței cât și capacității asociate. Cerința este aproximată prin liniarizare (dezvoltare în serie Taylor) în jurul valorii medii, iar fragilitatea este calculată prin simulare Monte Carlo. Procedura este exemplificată printr-un exemplu de calcul al unei clădiri D+P+14E care manifestă efecte de torsiune. Modurile de cedare sunt exprimate prin intermediul forței tăietoare, deformației specifice maxime în beton și capacității de rotire a grinzilor de beton armat. Repartițiile statistice ale tuturor variabilelor aleatoare de referință implicate în analiză au fost considerate lognormale.

Procedura propusă este eficientă în primul rând prin reducerea efortului de analiză rezultat din utilizarea calcului biografic în locul unei analize dinamice neliniare. În al doilea rând, este avantajoasă și ca urmare a posibilității de reutilizare a acelorași curbe de pushover pentru diferite niveluri ale cerinței de deplasare la nivelul acoperișului în vederea stabilirii parametrilor de împrăștiere statistică a răspunsului exprimat prin eforturi și deformații. Utilizarea simulării Monte-Carlo pentru determinarea fiabilității în locul metodelor analitice este de asemenea extrem de eficientă întrucât odată definite funcțiile de performanță, combinarea acestora pe baza teoriei seturilor se poate face ușor iar simularea nu implică reluarea analizei structurale.

Manipularea volumului mare de date s-a făcut prin diverse rutine originale (în limbaj FORTRAN) elaborate pentru transferul și pregătirea rezultatelor în formatul necesar prelucrării ulterioare. Prelucrarea statistică a variabilelor de referință, descrierea funcțiilor de performanță și efectuarea simulării Monte-Carlo s-a făcut în rutine FORTRAN și Mathcad. Variabilele de referință au fost prelucrate statistic în 40 de intervale caracteristice, iar numărul de simulări per funcție de performanță a fost considerat 15000.

Curba de fragilitate seismică a fost construită prin determinarea fiabilității pentru 8 niveluri de intensitate a mișcării seismice caracterizată prin accelerația spectrală (ca parametru de hazard) corespunzătoare modului propriu fundamental ($T=3\text{sec}$), și anume $S_a = 0.05, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.45$ și $0.55g$.

Prezentarea integrată a elementelor importante unui studiu SPRA în cadrul aceluiași material asigură continuitate metodologiei și înlesnește parcurgerea lucrării. Demonstrațiile prezentate detaliat în Anexe oferă fundamentul necesar înțelegerii corelațiilor realizate între anumite mărimi și propune o perspectivă convenabilă asupra oportunității utilizării unor relații de calcul în cadrul anumitor transformări.

Conținutul tezei a fost structurat astfel încât informația să fie introdusă gradual și este alcătuit din cinci secțiuni.

În *capitolul 1* sunt prezentate succint particularitățile de proiectare și evaluare a centralelor noi și existente cu accent pe evaluarea probabilistică a riscului seismic ca instrument esențial în identificarea corectă a scenariilor de accident.

Actiunile specifice, categoriile de tensiuni și reglementările aplicabile centralelor nuclear-energetice au fost prezentate în *capitolul 2*.

Capitolul 3 prezintă pe larg elementele cheie necesare unei evaluări probabilistice a riscului seismic: hazard seismic, fragilitate și risc. S-au detaliat metodele curente pentru determinarea fragilităților și anume EPRI, SAC și EFA.

Metodele principale de analiză structurală au fost introduse în *capitolul 4* împreună cu aplicații de calcul neliniar pentru un număr de structuri și echipamente întâlnite într-o centrală nuclear-energetică. S-au prezentat fragilitățile seismice determinate cu metoda EPRI pentru cupola inferioară a clădirii reactorului unei centrale de tip CANDU și pentru clădirea electrică a unei centrale de tip PWR. Alături de exemplele anterioare sunt prezentate: analiza impactului unui container care conține combustibil uzat, analiza de tensiuni a unui recipient și ancorajului acestuia, evaluarea seismică a unui sistem de conducte îngropat solicitat la deformare permanentă a pământului și analiza de lichefiere a pământului utilizând o procedură de calcul dinamic neliniar.

Capitolul 5 introduce analiza stohastică cu element finit și prezintă o propunere de calcul a fragilităților seismice utilizând o extindere a metodei EFA pentru sisteme structurale considerând mai multe moduri de cedare și determinare cerinței prin MPA. Cerința este determinată prin calcul static neliniar multimodal iar fiabilitatea sistemului este calculată prin metoda de simulare Monte-Carlo.

Direcții de aprofundare ulterioară:

Analiza stohastică cu element finit reprezintă un instrument puternic și sofisticat pentru determinarea fiabilității și mai departe a riscului sistemelor structurale și poate fi folosită atât pentru funcții de performanță implicite cât și explicite. Beneficiile unui sistem integrat de calcul al fiabilității sunt multiple și ar permite proiectantului să răspundă investitorului în multe situații în care apar întrebări de natură economică sau legate de eficiența tehnică a soluției alese. Însă, conceptul care stă la baza acestei metode prin care se îmbină analiza cu element finit și fiabilitatea este relativ nou, dar reprezintă cu certitudine o direcție utilă pentru dezvoltare având nenumărate posibilități de aplicație practică.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Abrahamson, N (2006b), 'Seismic Hazard Assessment: Problems with Current Practice and Future Developments', First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland.
- ACI (2006), 'Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures and Commentary', ACI Committee 349, American Concrete Institution, ACI-349.
- AISC (2012), 'Specification for Safety Related Steel Structures for Nuclear Facilities', American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC N690-12, Chicago, Illinois.
- ANS (2007), 'External Events in PRA Methodology', Standard, American Nuclear Society, ANS-58.21, La Grange Park, IL.
- ASCE (1980), *Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities*, American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- ASCE (1998), 'Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures and Commentary', ASCE Standard, American Society of Civil Engineers, ASCE 4-98.
- ASCE (2000a), 'Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures', ASCE Standard, American Society of Civil Engineers, 4-98.
- ASCE (2000b), 'Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings', American Society of Civil Engineers, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- ASCE/SEI (2005b), 'Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities', 43-05, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ASME (1983), 'Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)', Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components, American Society of Mechanical Engineers.
- ASME (1992a), 'Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NB Article 3000', American Society of Mechanical Engineers, ASME.
- ATC (2005), 'Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures', Applied Technology Council, FEMA-440 (ATC-55).
- Bathe, KJ (2006), *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Pearson Education.
- Bathe, KJ, Walczak, J, Welch, A & Mistry, N (1989), 'Nonlinear analysis of concrete structures', *Computers and Structures*, vol 32, no. 3/4, pp. 563-590.
- Campbell, KW (2003), 'Engineering Models of Strong Ground Motion', in WF Chen, C Scawthorn (eds.), *Earthquake Engineering Handbook*, CRC Press, Washington.
- Chopra, AK (2012), *Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering*, 4th, Prentice Hall, Boston.
- Chopra, AK & Goel, RK (2004), 'A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings', *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol 33, no. 8, pp. 903-927.
- Coman, O, Coman, D & Kope, F (2003), 'Accident Pressure Analysis for a Reinforced Concrete Containment with Steel Liner', Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Smirt, Prague, Czech Republic.
- Coman, O, Dragomirescu, A, Kope, F & Zemtev, N (2003), 'Seismic safety assessment of nuclear facilities other than NPPs', Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Smirt, Prague, Czech Republic.
- Cornell, CA (1968), 'Engineering Seismic Risk Analysis', *Bulletin of Seismological Society of America*, vol Vol. 58, pp. 1583--1606.
- Cornell, CA, Jalayer, F, Hamburger, RO & Foutch, DA (2002), 'Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines', *Journal of Structural Engineering*, vol April, pp. 526-533.
- EPRI (1994), 'Methodology for Developing Seismic Fragility', Research Project, Electric Power Research Institute, TR-103959, Palo Alto (California).
- Haldar, A & Mahadevan, S (2000), *Reliability Assessment using Stochastic Finite Element Analysis*, First Edition, John Wiley and Sons, Inc, New York.
- Köpe, F, Onofrei, C & Olteanu, P (2012), 'Statistical distributions for probabilistic seismic hazard analysis', *Rev. Roum. Sci. Techn. - Méc. Appl.*, vol Tome 57, no. 1.
- Lupoi, G, Franchin, P, Lupoi, A & Pinto, PE (2004), 'Seismic Fragility Analysis of Structural Systems', 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- PEER (2013), *PEER Ground Motion Database - PEER Center*
- Priestley, MJN, Calvi, GM & Kowalski, MJ (2007), *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- SOLVIA (2008), 'SOLVIA Finite Element System', User Manuals, SE-721 30, ver.03, Trefasgatan, Sweden.
- Youngs, RR, Chiou, SJ, Silva, WJ & Humphrey, JR (1997), 'Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes', *Seismological Research Letters*, vol Vol. 68, no. Number 1, pp. Pag. 58-73.