

Ministerul Educației și Cercetării
Universitatea Tehnică de Construcții București
Facultatea de Căi Ferate, Drumuri și Poduri



RĂSPUNSUL SEISMIC AL ANSAMBLULUI TEREN - FUNDAȚIE - STRUCTURĂ

RAPORTUL DE CERCETARE NR. 2

Doctorand

Ing. Mircea Conțiu

Conducător științific

Prof. Dr. ing. Dan Crețu

BUCUREȘTI 2020

1. INTRODUCERE

Majoritatea structurilor ingineresti intră în contact direct cu pământul, motiv pentru care comportarea lor este influențată de caracteristicile dinamice ale solului. Interacțiunea teren – structură poate duce la schimbarea comportării structurii supusă acțiunii seismice. În anumite cazuri, efectele SSI pot fi favorabile, reducând forțele care acționează asupra structurii, dar pot fi și defavorabile, astfel încât ignorarea lor poate avea consecințe dezastruoase.

În studiul de caz prezentat în continuare, se face o comparație între metodele de proiectare seismică a podurilor conform Eurocod 8 și analizele SSI dezvoltate în domeniul proiectării de centrale nucleare, ce include modele sofisticate pentru considerarea interacțiunii teren - structură, dar și pentru modelarea acțiunii seismice în sine, prin folosirea de date măsurate pe durata unor cutremure reale la estimarea comportării incoerente din câmpul de unde.

2. PODUL FARTEC

2.1. DESCRIEREA STRUCTURII

Structura studiată este podul Fartec din Brașov, Romania. Acesta a fost executat în 2012, proiectul fiind făcut conform normativelor europene.

Suprastructura este compusă din grinzi prefabricate din beton precomprimat solidarizate printr-o placă de suprabetonare și prin anetretoaze masive executate monolit pe reazeme. Schema statică este de grindă continuă. Tablierul are o lungime totală de 242 m, împărțită în 3 structuri de rosturile de dilatare: structura 1 este compusă din 2 deschideri de 29.15m, structura 2 din 4 deschideri de 29.15 m + 2 x 31.50 m + 29,15 m, iar structura 3 este similară cu structura 1. Chiar dacă tablierul nu este continuu pe toată lungimea sa, sistemul de rezemare de pe pile nu permite decât mici deplasări longitudinale, datorate dilatarii / contractiei din variații termice. Limitarea deplasărilor se face prin opritori masivi de beton. Pentru acțiunile seismice, care produc deplasări mult mai mari, rezemarea se va considera fixă pe tot parcursul analizei.



Fig. 1 Podul Fartec din Brașov, Romania

Pilele sunt compuse din doi stâlpi circulari cu diametrul de 1.50 m, care sunt conectați la partea superioară de o riglă cu secțiune dreptunghiulară de 2.50 m x 1.20 m. Înălțimea pilei variază de la 6.50 m până la aproape 9.00 m. Fundarea infrastructurilor se face pe 6 coloane forate cu diametrul de 1.08 m și lungime de 17.00 m conectați solidarizați printr-un radier. Studiul geotehnic descrie amplasamentul ca fiind o mixtură de nisip și pietriș.

Acest tip de structură este tipică pentru România și este o soluție folosită pe scară largă în toată țara.

2.2. MODELE STRUCTURALE ȘI ANALIZE COMPARATIVE

Pentru studiul comparativ s-au realizat două modele. Pentru structura în sine, ambele modele sunt echivalente; s-au folosit elemente de tip grindă și shell pentru a modela comportarea elementelor componente ale structurii. Podul a fost proiectat pentru comportare ductilă, permițându-se reducerea forțelor seismice datorită disipării de energie aferente formării de articulații plastice la baza stâlpilor pilelor. Comportarea neliniară a structurii (formarea articulațiilor plastice) este luată în considerare în analiza printr-o metodă liniară echivalentă acceptată în practică: reducerea rigidității de încovoiere la 50%. Restul elementelor din beton armat, adică toate elementele infrastructurii, se consideră că lucrează în stare fisurată, reducându-se modulul de elasticitate cu aprox. 20%.

Totuși, cele două modele diferă prin metoda de introducere a interacțiunii teren – structură și prin modul în care sunt aplicate solicitările seismice.

Primul model este cel care a fost folosit la proiectarea structurii și care respectă metodologia Eurocod și practica inginerescă românească în proiectarea podurilor și fundațiilor. Interacțiunea dintre fundație și teren este modelată prin modelul de grindă pe mediu elastic Winkler. Fig. 2 este extrasă din Normativul privind proiectarea geotehnică a fundațiilor pe piloți, indicativ NP 123:2010. Conform acestui normativ, pentru calculul deformațiilor și al eforturilor de-a lungul pilotului izolat, care este definit în sistemul de axe din Fig. 2 a și este încărcat transversal, terenul poate fi asimilat cu un mediu discret Winkler (Fig. 2 b) compus din resoarte independente. Rigiditatea resoartelor variază liniar cu adâncimea. Acest model va genera o diagramă a presiunilor similară ca formă cu cea din Fig. 2 c.

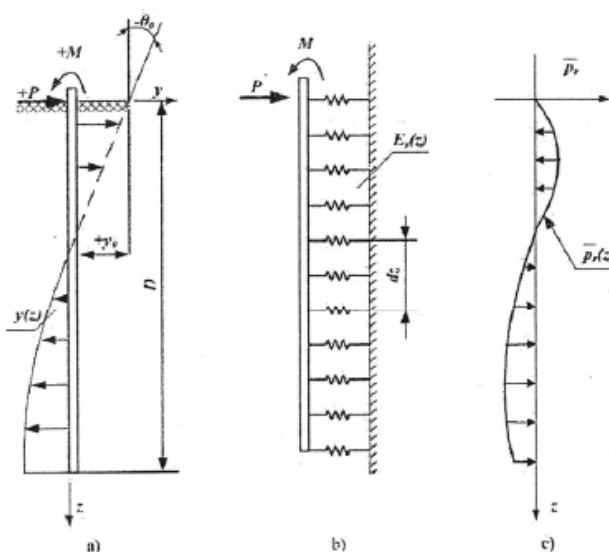


Fig. 2 Modelul de interacțiune pilot – teren, conform Normativului privind proiectarea geotehnică a fundațiilor pe piloți, indicativ NP 123:2010

Primul model a fost realizat folosind metodologia SSI prezentată anterior și este prezentat în Fig. 3 a. Încărcarea seismică este introdusă în structură printr-o accelerație uniformă ce acționează în toate punctele de reazem. Pentru acest model au fost generate 3 accelerograme artificiale: câte una pentru fiecare direcție.

Împingerea în regim seismic datorită umpluturii din rampa de acces acționează pe culee și a fost calculată prin modelul simplificat de presiune care variază liniar, conform teoriei Mononobe – Okabe.

În mod suplimentar, variația spațială a acțiunii seismice este luată în considerare conform prevederilor Eurocod 8, adică prin introducerea unor deplasări diferențiale statice la fiecare fundație prin două seturi de valori: setul A consideră deplasări care cresc în mod continuu în aceeași direcție începând dintr-un capăt, iar setul B deplasări alternative ca sens pentru fundații adiacente. Înfășurătoarea celor două seturi de valori se adună la rezultatele calculului seismic prin SRSS.

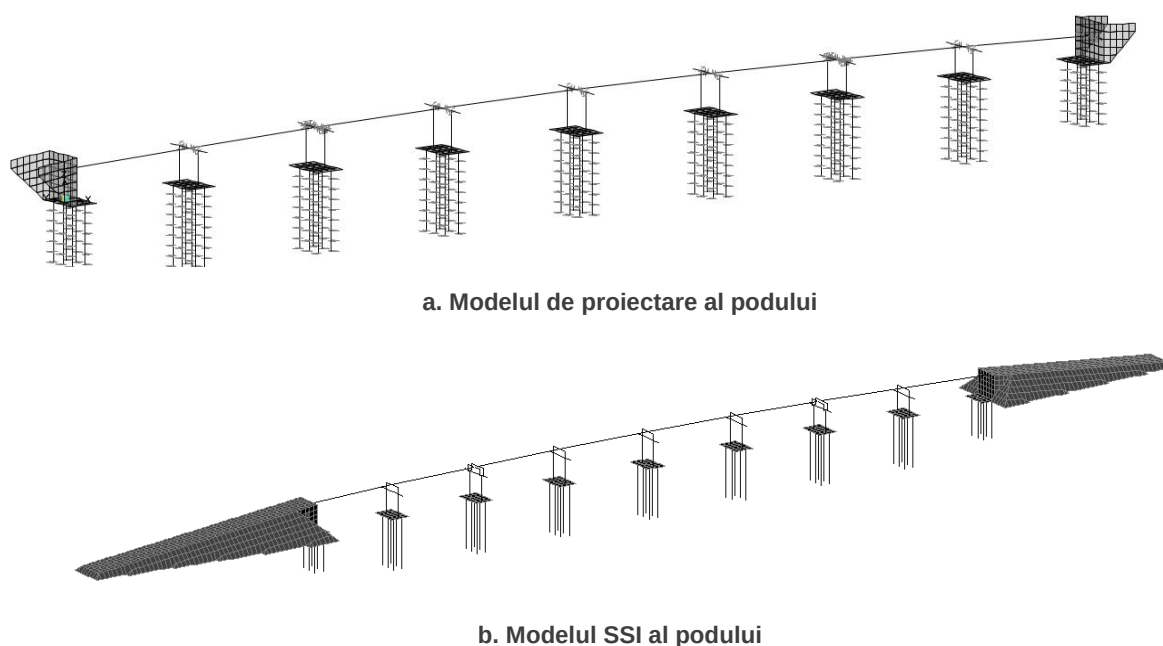


Fig. 3 Modelele folosite în prezentul studiu

Fig. 3 b prezintă cel de-al doilea model, modelul SSI al podului. Amplasamentul este modelat ca o serie de straturi orizontale dispuse peste un semi-spațiu visco-elastic la adâncime mare. Toate materialele de pământ au formulare visco-elastică. Analiza folosește o soluție complexă în domeniul frecvențelor, deci pot fi folosite doar modele liniarizate. Totuși, comportarea neliniară histeretică a solului poate fi aproximată prin procedura liniar echivalentă Seed – Idriss (Seed și Idriss, 1970), în care proprietățile dinamice efective ale solului (rigiditatea la forfecare și amortizare) sunt calculate individual pentru fiecare strat. Cota suprafeței terenului are valoarea $Z = 0$ și coincide cu suprafața radierelor și a bazei umpluturii din rampele de acces. Toate punctele sub acest nivel sunt considerate noduri de interacțiune cu straturile orizontale din câmp liber. După cum se observă și din poza de mai sus, umplutura din spatele culeei este modelată cu elemente solide având comportare de pământ.

Solicitările seismice sunt modelate prin introducerea unui câmp de unde seismice în câmp liber: pentru direcția X (longitudinal podului) sunt considerate unde SV, pentru direcția Y (transversal podului) unde SH și pentru direcția Z (verticală) unde P. Primul set de analize SSI sunt făcute pentru input seismic coerent.

Variabilitatea spațială a mișcării seismice în plan orizontal în vecinătatea structurii este considerată printr-un model de câmp stohastic. Presupunând un câmp stohastic gaussian omogen și isotropic, variabilitatea spațială poate fi definită prin funcția de coerență. Aceasta este adirecțională datorită presupunerii de izotropie a câmpului stohastic. Funcția de coerență izotropică este uni-dimensională, ceea ce înseamnă că orientarea în plan nu contează, ci numai distanța dintre două puncte. Abrahamson (1993, 2005, 2006, 2007) a creat o bază de date statistică de informații seismologice măsurate în matrici dense și a generat modele de incoerență empirice pentru unde plane pentru mai multe tipuri de sol și pentru diferite sisteme de fundare, prin formularea funcției de coerență. În acest studiu este folosit modelul Abrahamson 2005 (Ghiocel 2007, 2013). Pe lângă efectele de incoerență, se consideră și efectul de propagare a unei corespunzător unei viteze aparente a undelor de forfecare de 1,300 m/s în lungul podului. Folosind abordarea stohastică pentru incoerență disponibilă în ACS SASSI, s-au realizat 15 simulări incoerente pentru fiecare tip de sol.

Pentru ambele poduri s-a considerat un profil de sol constant cu proprietățile dinamice undeva între nisip compactat și pietriș.

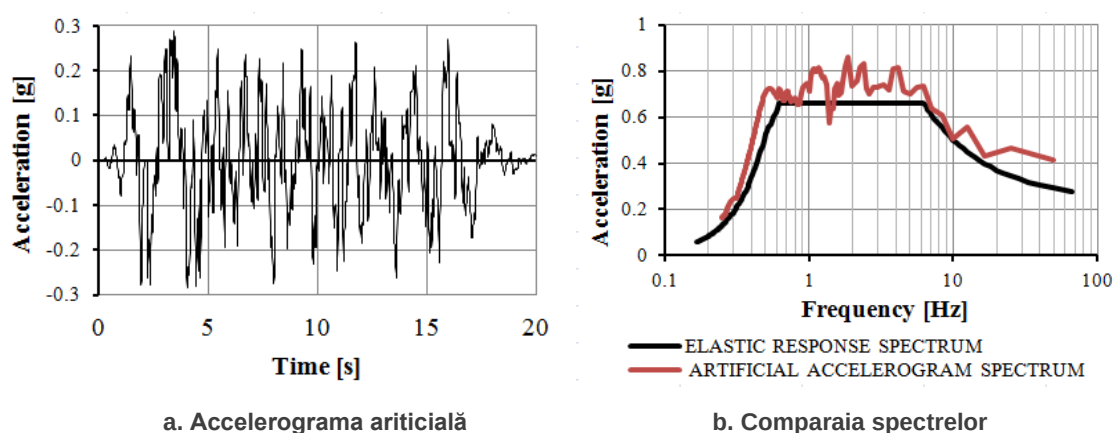


Fig. 4 Input seismic

Ambele modele au fost supuse aceleiași accelerograme, generate din spectrul de răspuns elastic corespunzător amplasamentului podului. Accelerograma orizontală este prezentată în Fig. 4 a; în Fig. 4 b se regăsesc spectrul de răspuns elastic și spectrul accelșerogramei artificiale. Pentru acest studiu, nu contează faptul că spectrul accelșerogramei depășește spectrul de proiectare; toate rezultatele vor fi prezentate comparativ, punându-se accent pe diferențele de comportare și nu pe valorile absolute obținute.

2.3. MODELE STRUCTURALE ȘI ANALIZE COMPARATIVE

Rezultatele care vor fi comparate sunt eforturile structurale pentru stâlpii pilelor și piloții corespunzători. Se vor prezenta două pile: o pilă de capăt (cea mai scurtă și cea mai rigidă, având înălțimea de 6.90 m) și o pilă centrală (cea mai flexibilă, având înălțimea de 9.00 m).

Pentru a simplifica secțiunea de prezentare a rezultatelor vor fi folosite următoarele notații. Pentru modelul de proiectare conform Eurocod, analiza seismică dinamică este prescurtată DESIGN și cea care include și metoda statică simplificată de variație spațială SPA_VAR. Pentru modelul SSI, analiza coerentă este prescurtată COH și cele 15 simulări SSI incoerente INCOH_RUNS: Pentru aceste simulări incoerente, s-a calculat răspunsul SSI mediu, de numit INCOH_MEAN. Acolo unde sunt specificate direcțiile X, Y sau Z se referă la direcția acțiunii seismice.

M simbolizează momente încovoietoare, V forțe tăietoare și N forțe axiale. Direcțiile locale ale grinzilor sunt: 1 în lungul elementului, 2 în lungul podului, 3 în sens transversal podului.

Rezultatele sunt prezentate în grafice cu eforturi pe abscisă și cote de nivel pe ordonată. Cota 0 reprezintă punctul de trecere de la pilot la pilă; cu alte cuvinte, toate valorile deasupra abscisei sunt eforturi în stâlpii pilei, iar tot ce se află sub abscisă se referă la piloți. Scara reprezentării pe orizontală variază între stâlpii elevației și piloți; axele cu valori se găsesc la partea superioară / inferioară a graficelor.

Fig. 5, 6 și 7 prezintă momentul încovoietor 3, forța tăietoare 2 și forța axială pentru solicitarea seismică pe direcția X.

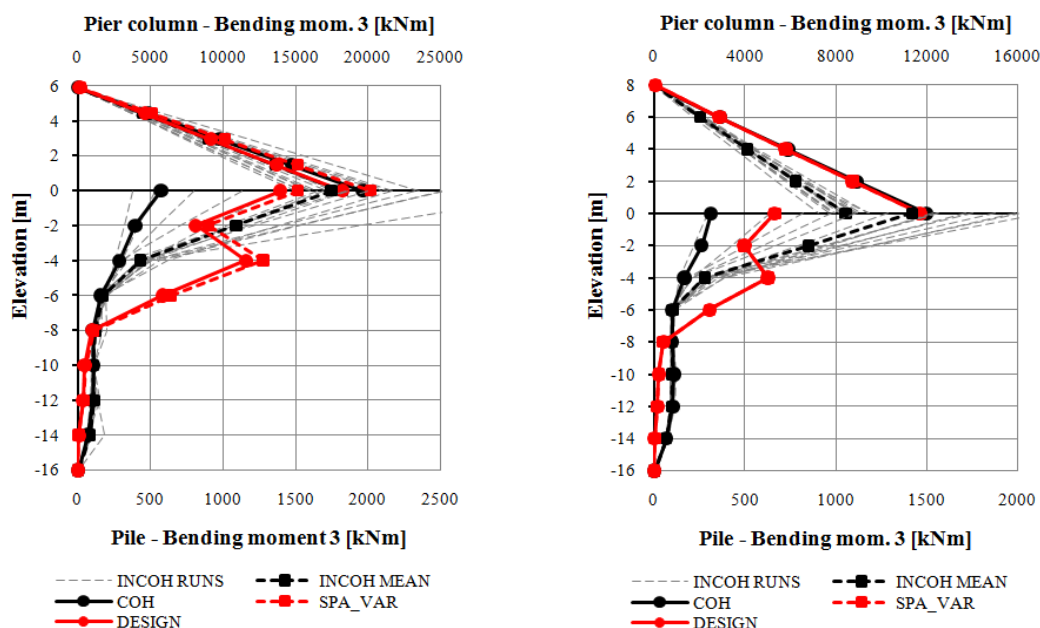


Fig. 5 Momentul încovoietor 3 pentru solicitarea seismică pe direcția X

(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

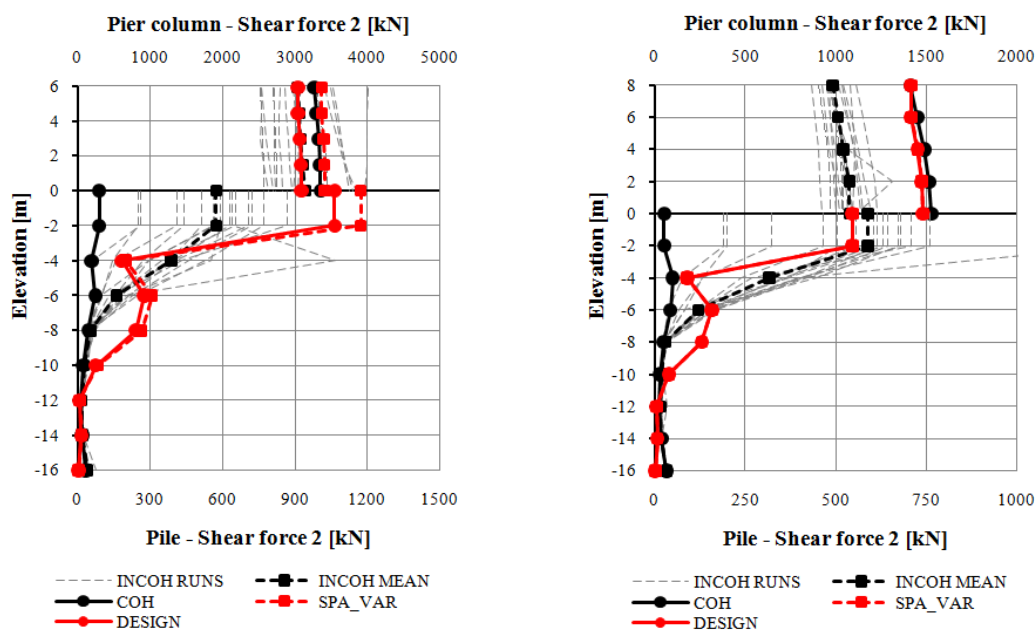


Fig. 6 Forța tăietoare 2 pentru solicitarea seismică pe direcția X

(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

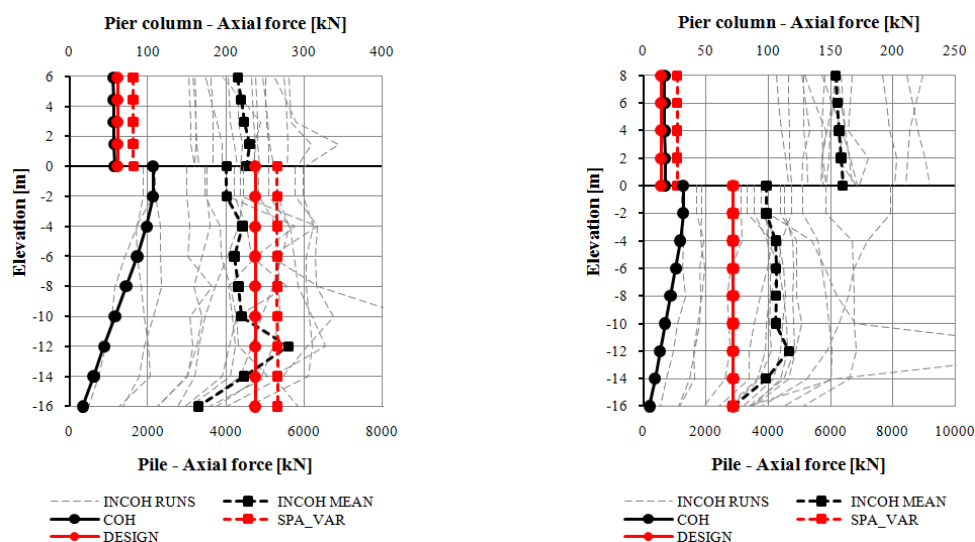


Fig. 7 Forța axială pentru solicitarea seismică pe direcția X
(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

La compararea momentelor încovoietoare și a forțelor tăietoare pentru piloți se observă diferențe ale formei diagramei. În mod uzual, pe modelele de proiectare curente momentul încovoietor maxim în piloți se atinge la o adâncime de aprox. 2 – 3 ori diametrul său. În cazul modelului rafinat SSI, momentul maxim este prelungit pe o zonă destul de mare.

Se observă și faptul că introducerea variației spațiale a acțiunii seismice prin metoda statică simplificată nu produce decât o creștere nesemnificativă a valorii, față de analizele incoerente care cresc de până la 10 – 20 ori valorile din analiza coerentă.

În piloții pilei de capăt mai rigide, modelul de proiectare supraevaluează momentele încovoietoare și forțele tăietoare, ultima fiind depășită de 2.00 ori. În schimb, piloții pilei centrale sunt subdimensionați la încovoiere cu un factor mai mare de 2.00.

Elevația pilei are însă un comportament total diferit de piloți: în cazul pilei de capăt mai rigide, modelul de proiectare dă rezultate bune, dar pentru pila centrală mai flexibilă modelul de proiectare supraestimează eforturile cu 30 – 50%.

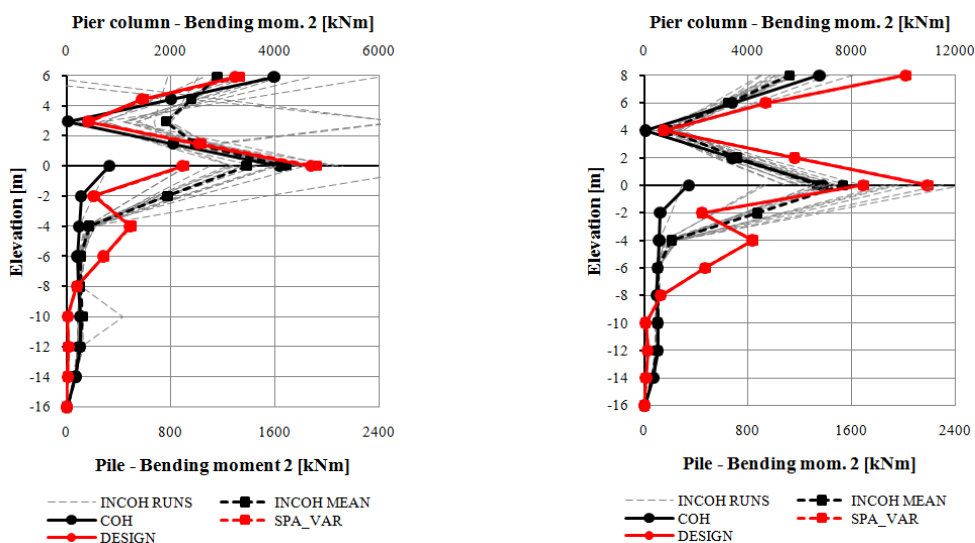


Fig. 8 Momentul încovoietor 2 pentru solicitarea seismică pe direcția Y
(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

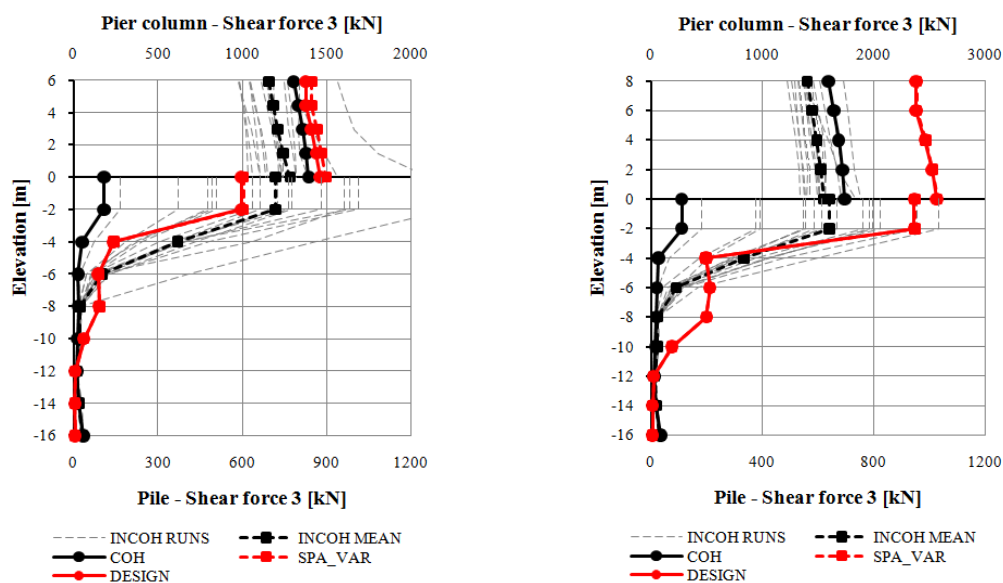


Fig. 9 Forța tăietoare 3 pentru solicitarea seismică pe direcția Y
(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

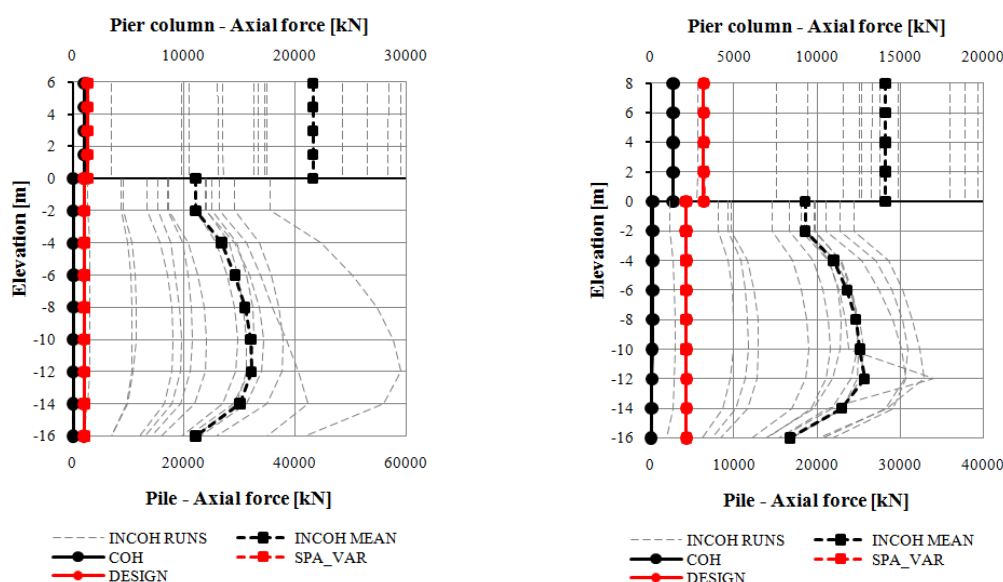


Fig. 10 Forța axială pentru solicitarea seismică pe direcția Y
(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

Fig. 8, 9 și 10 prezintă momentul încovoietor 2, forța tăietoare 3 și forța axială pentru solicitarea seismică pe direcția Y. În această direcție podul geerează un răspuns mult mai rigid la acțiunea seismică datorită orientării fundației și a schemei de cadru a stâlpilor pilei cu rigla.

Pe această direcție metoda simplificată de considerare a variabilității spațiale a acțiunii seismice nu produce creșteri mai mari de 2-3%, lucru complet nesemnificativ față de incoerență care produce creșteri de până la 6 ori.

În această direcție, momentele încovoietoare 2 și forțele tăietoare 3 sunt mult mai apropiate. Modelul de proiectare este depășit cu 30% la încovoierea piloților pilei de capăt, dar supraevaluează cu 40-50% forța tăietoare în piloții pilei centrale.

Se observă forțele axiale foarte mari care apar atât în piloți cât și în pile. Acestea provin din inerția structurii care creează un moment încovoietor foarte mare ce se descarcă axial în stâlpii pilei. O alta problema este păstrarea liniarității solului în jurul fundației; în realitate solul din această zonă s-ar comporta mult mai slab, datorită deformărilor mari la care este supus. Această problemă va fi rezolvată în următoarea etapă a studiului nostru.

Fig. 11 și 12 prezintă forța axială și forța tăietoare 2 pentru solicitarea seismică pe direcția Z.

Forța axială din cazult INCOH_MEAN depășește valoarea de proiectare de aprox. 2 ori. Totuși valorile nu sunt suficient de mari pentru a genera probleme de proiectare.

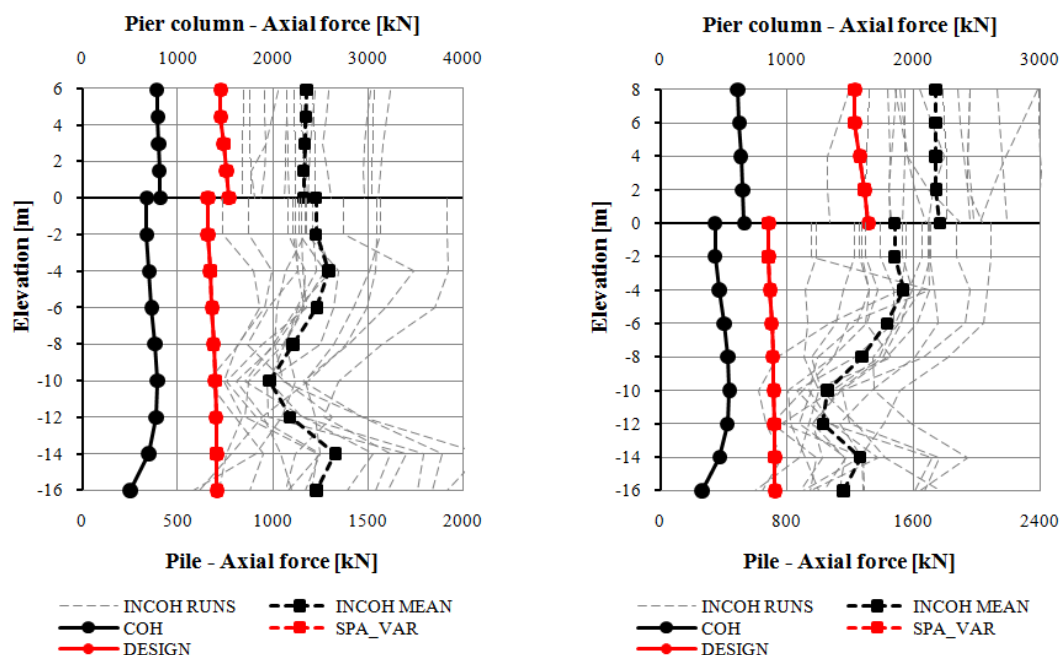


Fig. 11 Forța axială pentru solicitarea seismică pe direcția Z

(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

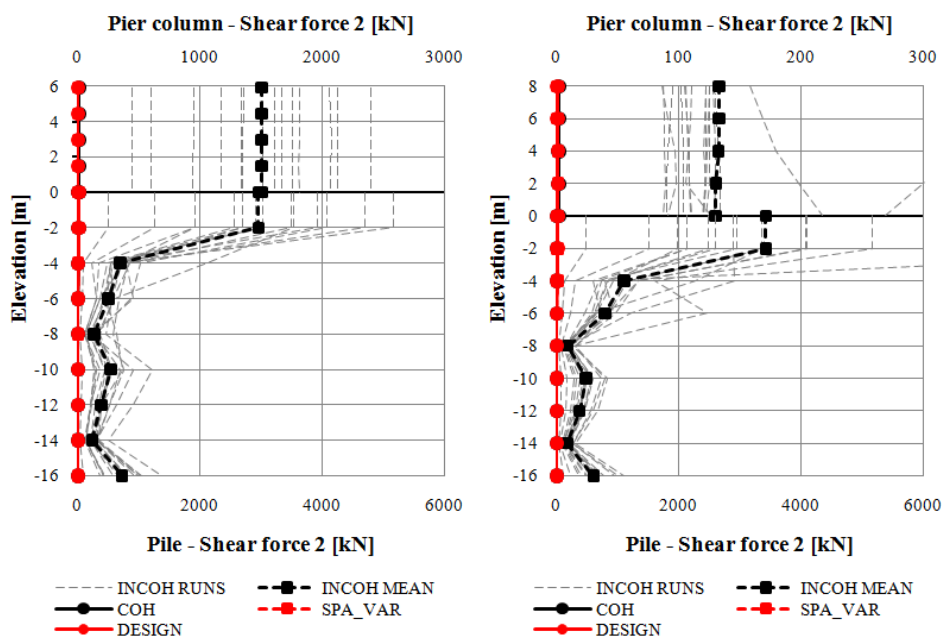


Fig. 12 Forța tăietoare 2 pentru solicitarea seismică pe direcția Z

(stânga = pila de capăt, dreapta = pila centrală)

Un aspect ce necesită atenție este faptul că presupunerea de input coerent produce rezultate neconservatoare atât în modelul de proiectare cât și în cel de SSI rafinat. În realitate, datorită variației spațiale a mișcării pământului și a prezenței altor tipuri de unde ce nu au propagare pe verticală (și sunt simulate de analizele incoerente), forțele tăietoare și momentele din structură sunt considerabil mai mari. Cazurile DESIGN și SPA_VAR au dat rezultate aproape nule. În mod real, datorită incoerenței mișcării apar rotiri ale fundațiilor izolate care nu pot fi surprinse într-o analiza coerentă cu propagarea pe verticală a undelor. Totuși, trebuie reținut și faptul că în prezentul studiu rezultatele SSI incoerente sunt obținute considerând contact rigid pilot – teren și proprietăți elastice ale betonului și ale solului. Dacă ar apărea efecte de plasticizare a solului din imediata apropiere a fundației, eforturile mari obținute în studiul de față ar putea scădea considerabil. O astfel de investigație cu SSI neliniar este plănuită în viitor.

Fig. 13 prezintă două ploturi de accelerații pentru mișcarea incoerentă. Prima este o vedere în elevație, iar cea de-a doua o vedere plană. Se observă că podul nu este excitat de o accelerație constantă în aceeași direcție. Elementele pare “rupte”, mai ales piloții. Aceștia sunt supuși la accelerații variabile pe lungimea lor datorită diferențelor în mișcarea pământului, efect ce provine din incoerența undelor. Se poate observa că și suprastructura este supusă accelerațiilor puternic variabile atât pe orizontală, cât și pe verticală. Un alt efect interesant este faptul că undele seismice cu lungime a undei foarte mare deplasează podul aproape ca un rigid.

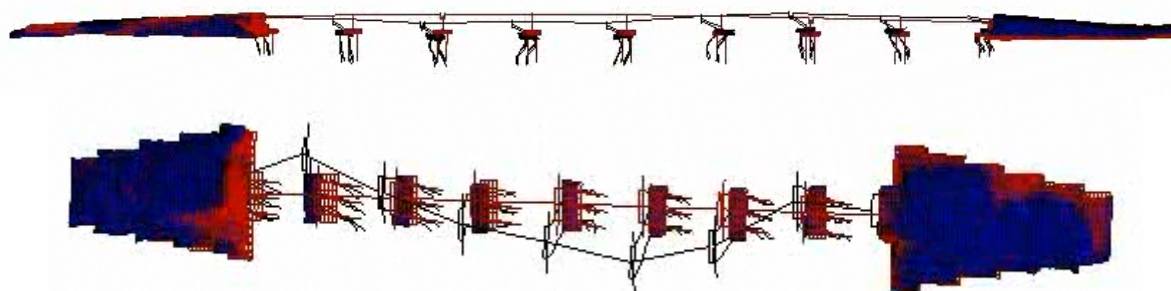


Fig. 13 Accelerații incoerente instantane ale structurii podului în elevație și plan (albastru este forma deformată, roșu cea nedeformată)

Fig 14 prezintă deformata structurii pe durata unui eveniment seismic incoerent. Scara de plotare este mare și arată efectul de mișcare a podului pe o undă cu lungimea mare, similar cu mișcarea unui vas pe valuri foarte mari. Datorită deplasărilor incoerente diferențiale locale, piloții și stâlpii pilelor sunt supuși la forțe tăietoare mari ce determină deformații diferite pe lungimea lor (și aspectul “rupt”).

Tabelul de mai jos compară deplasările relative maxime pentru două fundații consecutive conform metodei simplificate din Eurocod 8 și valoarea medie obținută în analiza incoerentă. Este clar ca modelul EC8 subestimează aceste deplasări relative ce au loc între fundațiile structurii.

	SPA_VAR	INCOH_MEAN
Consecutive foundations relative displacements [mm]	7.54	14.45

2.4. CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE

Concluzia generală este faptul că metodologia de proiectare a fost validată pentru situația de input seismic coerent. În majoritatea cazurilor, proiectarea EC8 a fost conservatoare, iar când aceasta a fost depășită s-a întâmplat cu un procent redus, ce poate fi atribuit coeficienților de siguranță.

Pe parcursul studiului au apărut diferențe de formă și comportare a piloților între modelul simplificat de interacțiune cu terenul conform normelor de proiectare (grinda pe mediu Winkler cu rigiditatea resoratorilor crescând cu adâncimea) și modelul SSI sofisticat.

Metoda simplificată de variație spațială a acțiunii seismice dată în Eurocod 8 influențează foarte puțin structura. Chiar dacă este posibil ca ea să genereze eforturi mari pentru structuri foarte rigide, pentru cazul de față, care este destul de flexibil, efectul ei este de maxim 10% pe direcția X și sub 2% pe celelalte direcții; efectul în direcția longitudinală este mai mare deoarece suprastructura transmite încărcările axial și dă un răspuns foarte rigid. O altă problemă a metodei simplificate este aceea că ea nu reușește să capteze forțele de forfecare mari la care sunt supuși piloții datorită incoerenței undelor seismice în sol. Procedura este să se introducă o singură deplasare pe fundație, ceea ce înseamnă că toată fundația se mișcă concomiten, neavând cum să apară eforturi.

Modelul de proiectare a dat un răspuns puternic pentru acțiunea seismică coerentă față de modelul SSI rafinat, mai ales pentru piloți. Pe de cealaltă parte, modelul SSI rafinat este foarte puternic afectat de incoerența undelor seismice. Datorită răspunsului original mare, rezultatele coerente pe modelul simplificat nu sunt foarte departe de cele incoerente pe modelul SSI. Nu se pot da răspunsuri clare pentru situații generice, dacă proiectarea subestimează sau supraestimează eforturile structurale, bazându-se doar pe baza studiului limitat la această structură. În acest studiu, modelul SSI rafinat produce un răspuns redus pentru pila centrală, mai flexibilă, și a fost foarte aproape de modelul de proiectare la pila de capăt, mai rigidă. Singurul lucru ce poate fi afirmat cu siguranță este faptul că modelele curente de proiectare nu reușesc să capteze toate efectele demonstrate de modelul SSI rafinat. Comunitatea de proiectanți de poduri trebuie să înceapă să considere interacțiunea teren – structură incoerentă pentru a evita tragedii sau a scădea costurile de construcție.

Ca o direcție viitoare a studiului, se va folosi un model mai rafinat al podului, care să estimeze mai bine rigiditatea suprastructurii și a legăturii cu infrastructura. O altă temă cu prioritate ridicată este introducerea neliniarității în pământul din imediata apropiere a fundației, incluzând efecte de plasticizare locală al solului.

3. STUDIUL DETALIAT AL FUNDAȚIEI

După finalizarea studiului inițial pe podul Fartec s-au stabilit două direcții în care trebuie să continue proiectul de cercetare:

- Realizarea unui model mai rafinat, mai ales legat de modelarea suprastructurii
- Introducerea neliniarității pământului în imediata apropiere a fundației

Primul punct se poate rezolva direct și necesită studii suplimentare. Însă cel de-al doilea punct este indiscutabil mai complicat. Complexitatea foarte ridicată a problemei, determinată de numărul mare de parametri variabili și de decizii de modelare ce trebuie luate, a dus la necesitatea de a împărți acest studiu în mai multe etape.

S-a ales modelarea unei singure pile, cu masa corespunzătoare a suprastructurii concentrată într-un element la vârful acesteia. Pentru compararea modelelor între ele se vor citi următoarele rezultate:

- Spectrul de răspuns la nivelul suprastructurii
- Deplasarea la nivelul suprastructurii
- Eforturile (momente încovoietoare, forțe tăietoare, forțe axiale) în stalpii pilei și în piloți

Una dintre primele decizii este legată de metoda de substructurare. Metoda volumului flexibil (FV) este cea mai exactă, dar datorită numărului mare de noduri de interacțiune și cea mai încheată ca timp de analiză. Se investighează posibilitate folosirii metodei de interfață flexibilă (FIT). Pentru a se putea valida folosirea acesteia, ea trebuie comparată cu analizele FV și stabilit dacă răspunsul este suficient de exact.

Pentru a putea include efectele neliniare ale pământului din jurul fundației, volumul de pământ a fost adăugat în model, în jurul elementelor structurale de beton. Se disting două posibilități: modelarea pământului în jurul fiecărui pilot independent sau modelarea unui volum global ce include toată fundația. Modelele realizate conform primei metodologii se numesc Local, iar cei cu cea de-a doua metodă Global.

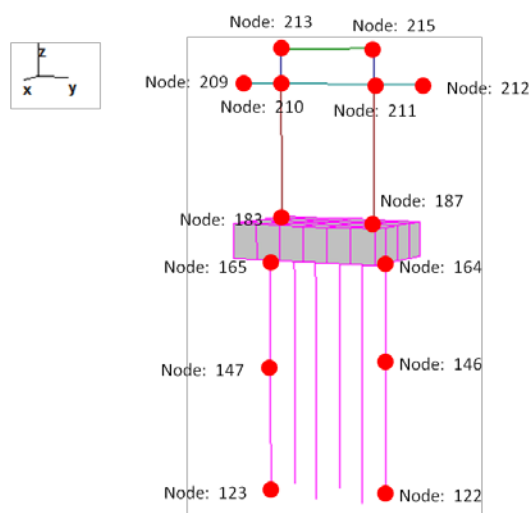
O altă variabilă importantă o reprezintă dimensiunea rețelei în modelul FEM. Pentru a se putea verifica ce efect are folosirea unei rețele mai fine, s-au ales două dimensiuni ale modelelor, denumite L și M. A fost realizat și un model S, dar acesta era prea mare și nu putea fi rulat de software, depășind numărul maxim de noduri.

3.1. ANALIZA LINIARĂ A UNEI PILE

Înainte de a se face analiza neliniară, trebuie validat modelul ales pentru analize liniare. Modelele luate în calcul includ mai multe metode de modelare a structurii, mai exact a fundației, și a terenului din jurul acesteia. În această primă etapă, studiul se va rezuma doar la analize coerente.

3.1.1. BEAMS

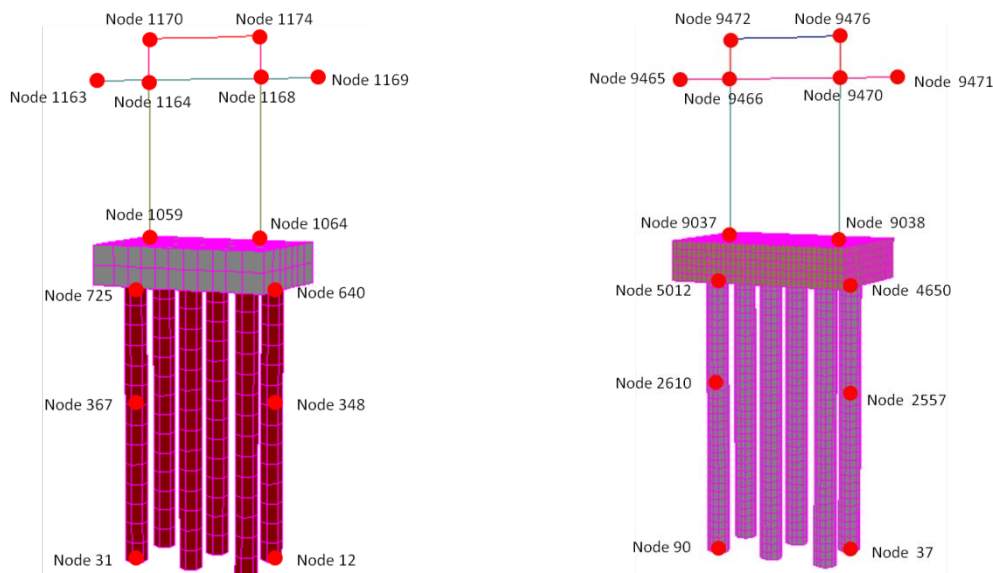
Modelul realizat cu piloții din elemente de tip grindă și este echivalent cu modelul podului Fartec, folosit în prima etapă a studiului. Singura modificare o reprezintă modelarea radierului cu solide, față de modelul inițial unde a fost modelat cu shell-uri.



3.1.2. NoSoil_L și NoSoil_M

Modelul NoSoil are fundația realizată exclusiv din elemente solide, dar nu include elemente pentru modelarea terenului din jurul fundației. Acesta a fost introdus doar pentru verificarea rigidității primei soluții de modelare (Beams).

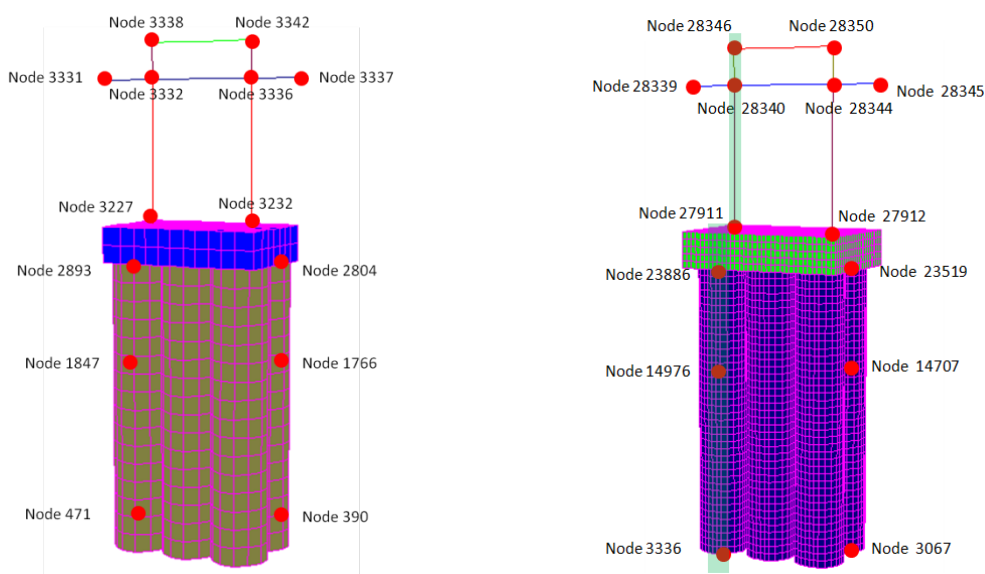
Modelul este prezentat în figura de mai jos. Din dimensiunea rețelei de elemente finite, se observă că figura din stânga reprezintă modelul NoSoil_L, iar cea din dreapta NoSoil_M.



3.1.3. Local_L și Local_M

Modelul Local conține coloane de pământ în jurul fiecărui pilot și puncte de interacțiune pe conturul acestora. Novak (2003) recomandă folosirea unei grosimi minime de pământ în jurul pilotului de beton egală cu diametrul pilotului. În cazul de față această cerință, a dus la unirea volumelor de pământ între ele, rezultând ceva apropiat modelului Global. Totuși, diferența față de modelele Global este faptul că în această modelare apăreau noduri de interacțiuni și în interiorul volumului.

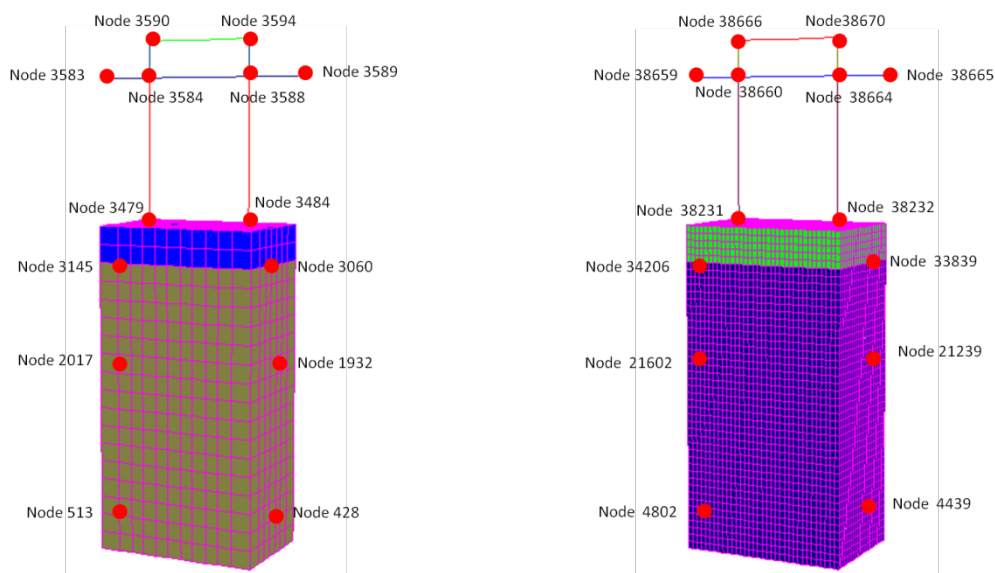
Modelele Local_L(stanga) și Local_M (dreapta) sunt prezentate mai jos. Din figuri se pot distinge coloane circulare din jurul piloților.



3.1.4. GLOBAL_L ȘI GLOBAL_M

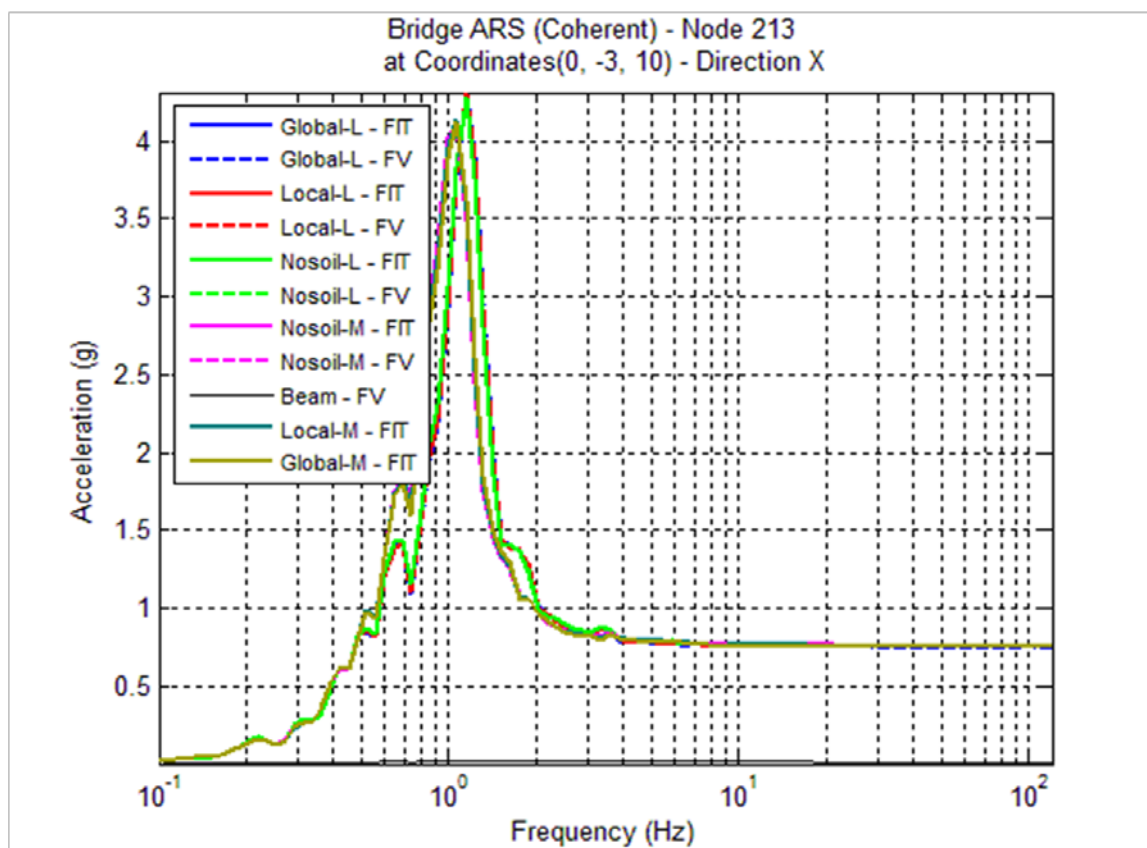
Modelul Global conține un volum mare de pământ în care este scufundată structura de beton.

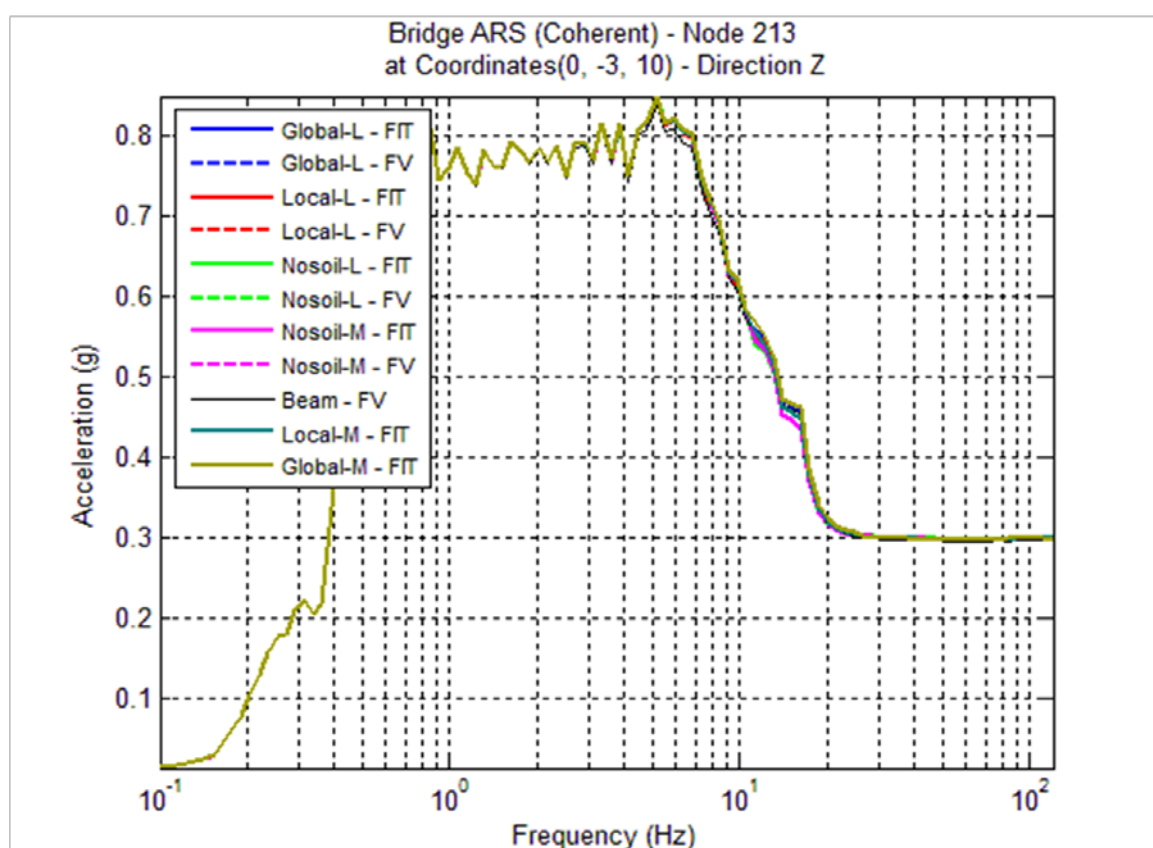
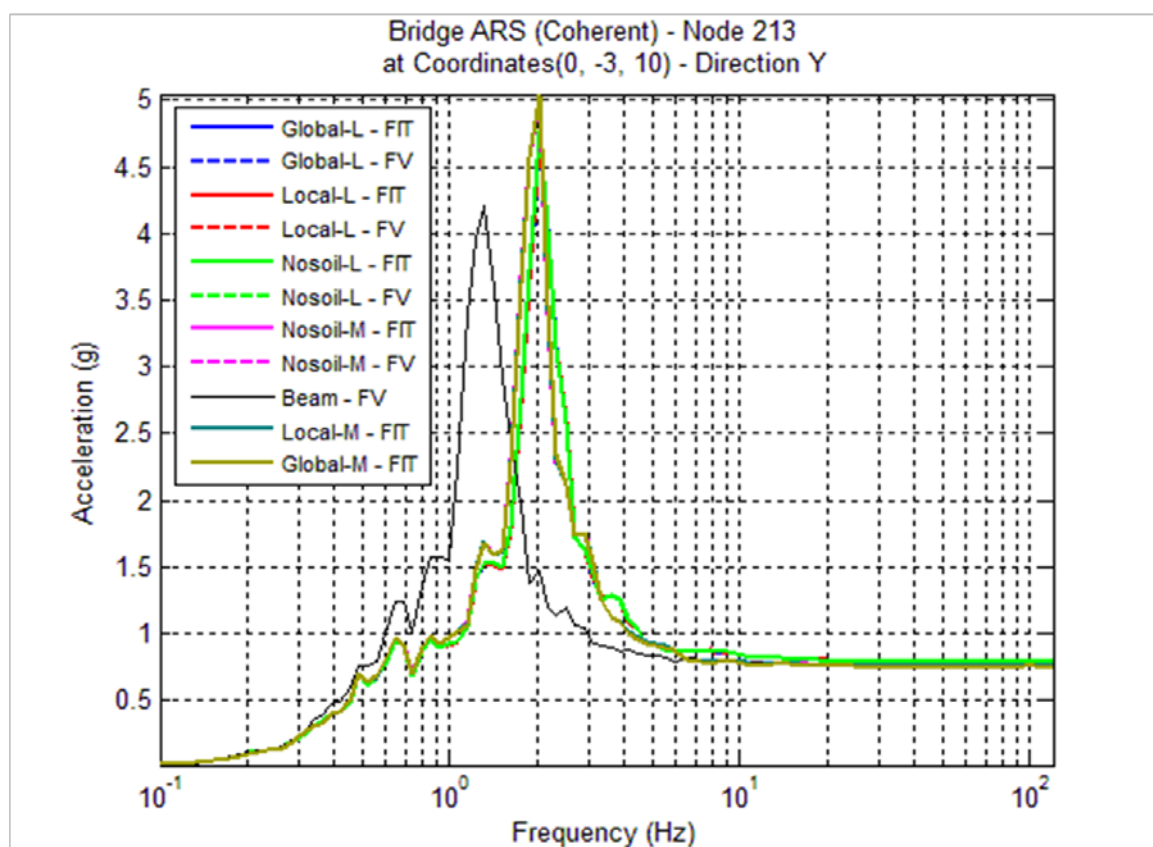
Modelele Global_L(stanga) și Global_M (dreapta) sunt prezentate mai jos. Din figuri se poate distinge forma de paralelipiped dreptunghic a volumului de sol din jurul fundației.



3.1.5. REZULTATE ȘI COMPARAȚII

În figurile de mai jos sunt prezentate spectrele de răspuns în accelerații pentru un nod de la nivelul suprastructurii, pe cele trei direcții ortogonale.



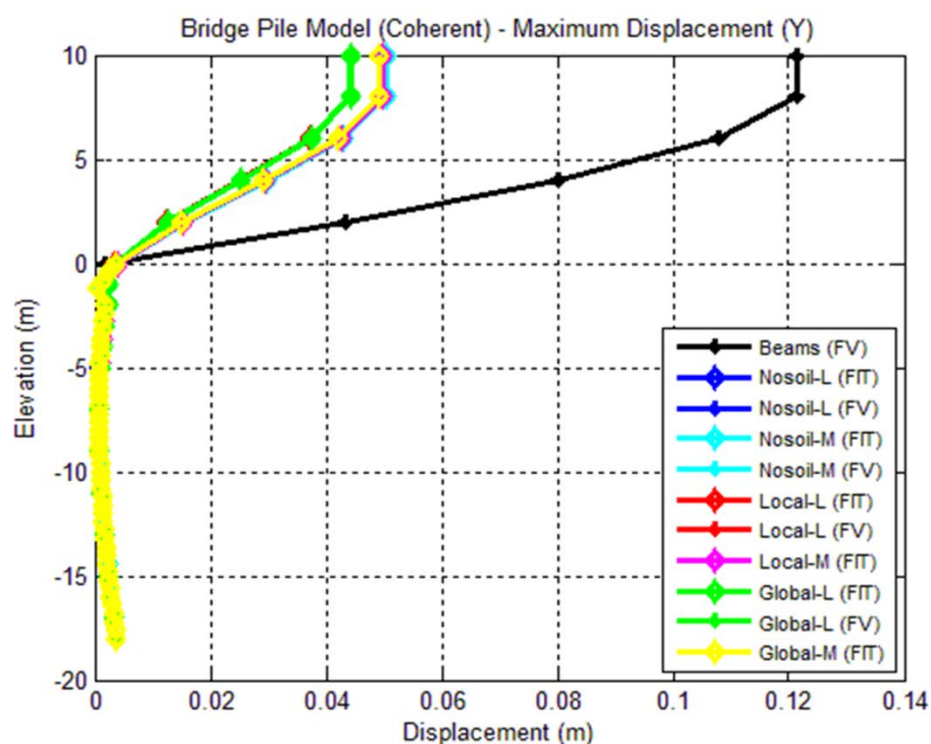
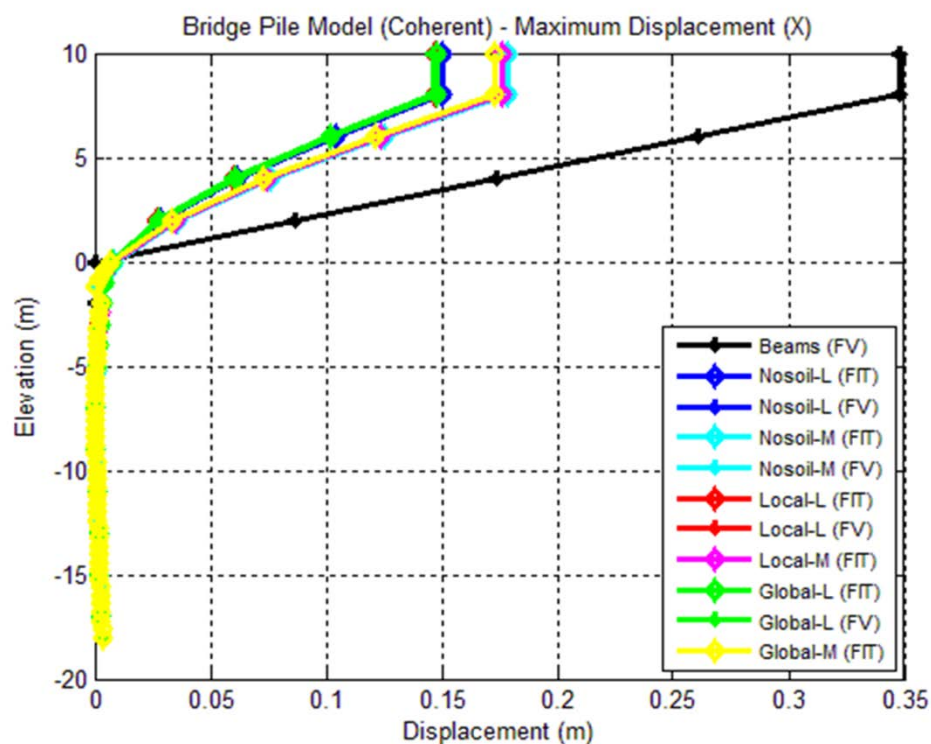


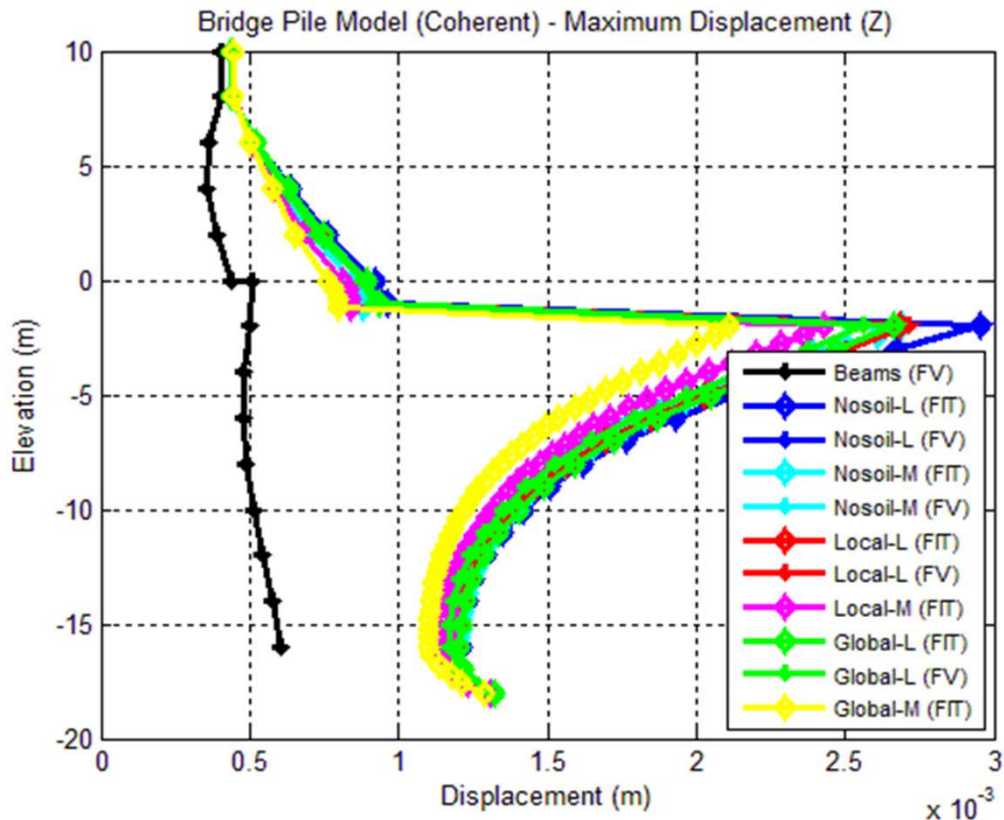
Se observă că toate modelele au rezultate foarte apropiate, cu excepția modelului Beams. Pe direcția Y, rigiditatea este estimată deficitar.

Introducerea elementelor de volum în jurul piloților nu are un efect foarte important. Acest lucru era de așteptat, deoarece fără considerarea neliniarității elementele de volum au aceeași comportare ca și straturile din câmp liber.

Se observă o foarte bună corelare între modelele FV și FIT. Acest lucru validează posibilitatea continuării studiului doar cu modelarea FIT, care duce la timpi de analiza mult mai mici.

Figurile de mai jos prezintă deformata maximă a structurii din acțiunea seismică.





Din nou se observă faptul că modelul Beams nu estimează corect rigiditatea. La încovoiere, acest model este prea flexibil, lucru observat și din spectrele de răspuns unde frecvența de vibrație a modelului era mai mică. Restul modelelor se comportă similar.

3.1.6. CONCLUZII

Prima etapă a studiului pilei a demonstrat că modelul Beams nu estimează corect rigiditatea, motiv pentru care acesta nu va fi folosit în continuare.

Restul modelelor au avut rezultate similare. Deoarece folosirea metodei de substructurare a interfeței flexibile a fost validată prin comparație cu cea a volumului flexibil, studiul va continua doar cu modelele FIT. Modelele cu rețeaua cu elemente finite mai mari a funcționat bine și a dat rezultate bune. Din acest motiv, modelele L vor fi folosite în continuare.

În următoarea etapă, se va continua cu metodologia de introducere a solului în imediata apropiere a fundației conform modelului Global.

3.2. ANALIZA NELINIARĂ A PILEI

Această a doua etapă a studiului pleacă de la rezultatele analizei liniare. După cum am stabilit, se va folosi metodologia din modelul Global_L_FIT :

- utilizarea metodei de substructurare de interfață flexibilă
- modelarea solului din apropierea fundației într-un paralelipiped dreptunghic în care se se “scufundă” structura
- folosirea rețelei cu elemente mai mari

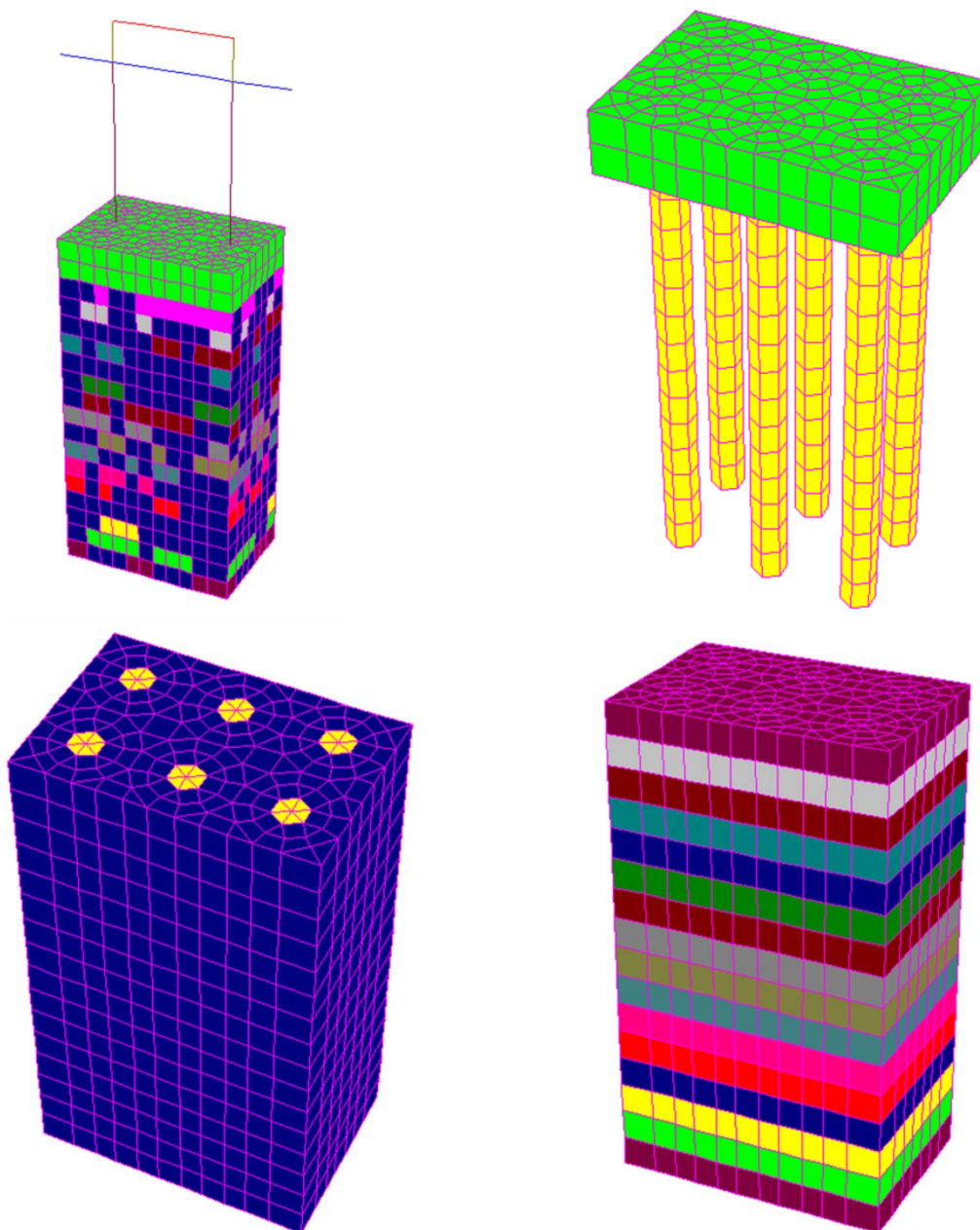
Pentru simplificarea și mai mult a modelului, se încearcă înlocuirea piloților circulari, care devin hexagonali datorită mărimii rețelei de element finit, cu piloți dreptunghiulari cu moment de inerție egal.

3.2.1. GLOBAL_L_FIT CU PILOTI HEXAGONALI

Figurile de mai jos prezintă modelul Global_L_FIT în soluția cu rețeaua de element finit mai sofisticată, în care piloții circulari sunt introduși ca elemente hexagonale.

Figura din stanga sus este o vedere globală asupra modelului. În dreapta sus sunt prezentate doar elementele de beton, adică radierul și piloții. Figura din stânga jos include piloții de beton și volumul de sol din jurul modelului; se observă rețeaua de element finit mai sofisticată și forma hexagonală a piloților. În dreapta jos este prezentat volumul de teren excavat, care are câte un material diferit pentru fiecare strat.

Acest model va fi prescurtat mai devreme HEXAGON.

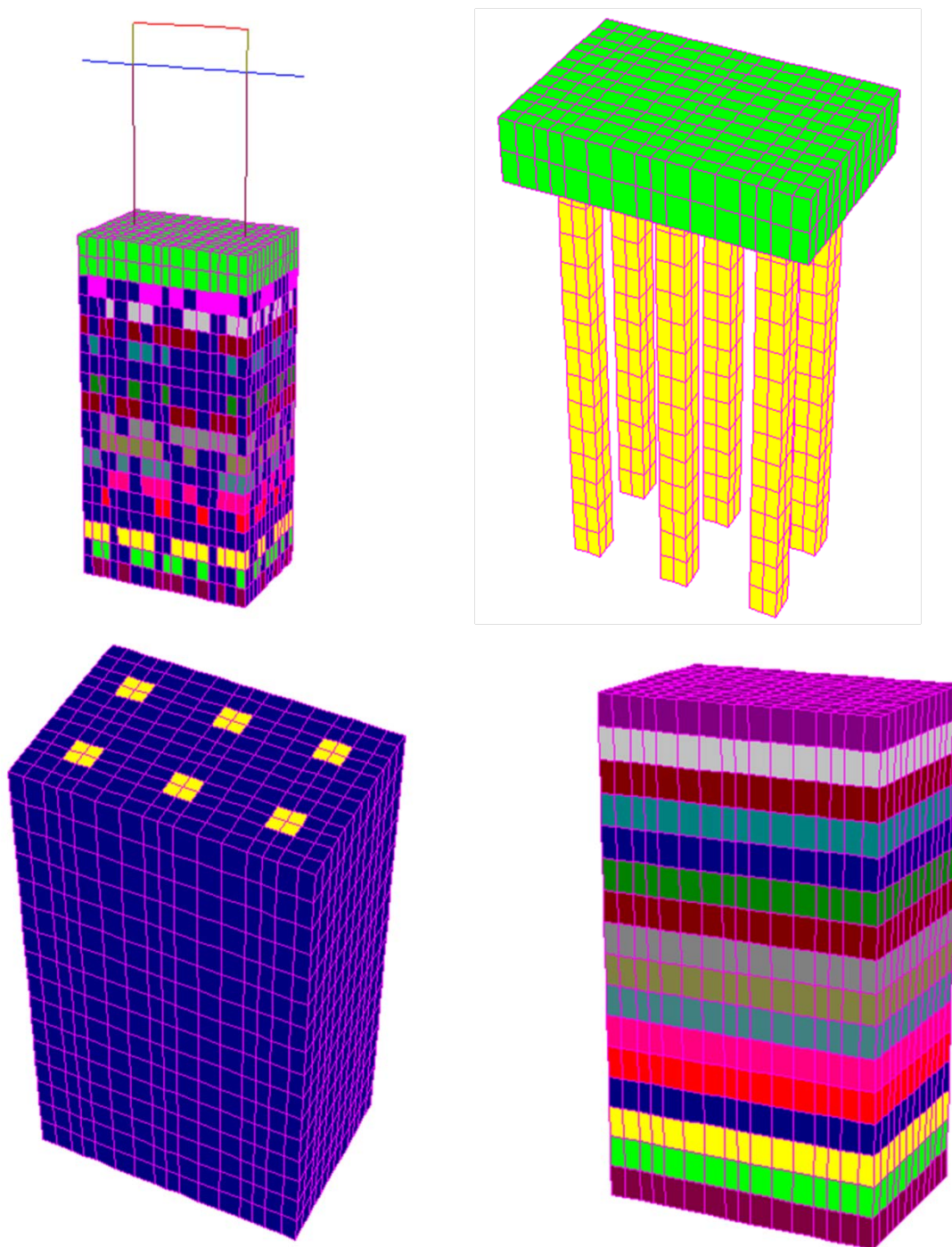


3.2.2. GLOBAL_L_FIT CU PILOTI PĂTRAȚI

Figurile de mai jos prezintă modelul Global_L_FIT în soluția cu rețeaua de element finit simplificată în care piloții circulari sunt echivalați cu piloți pătrați.

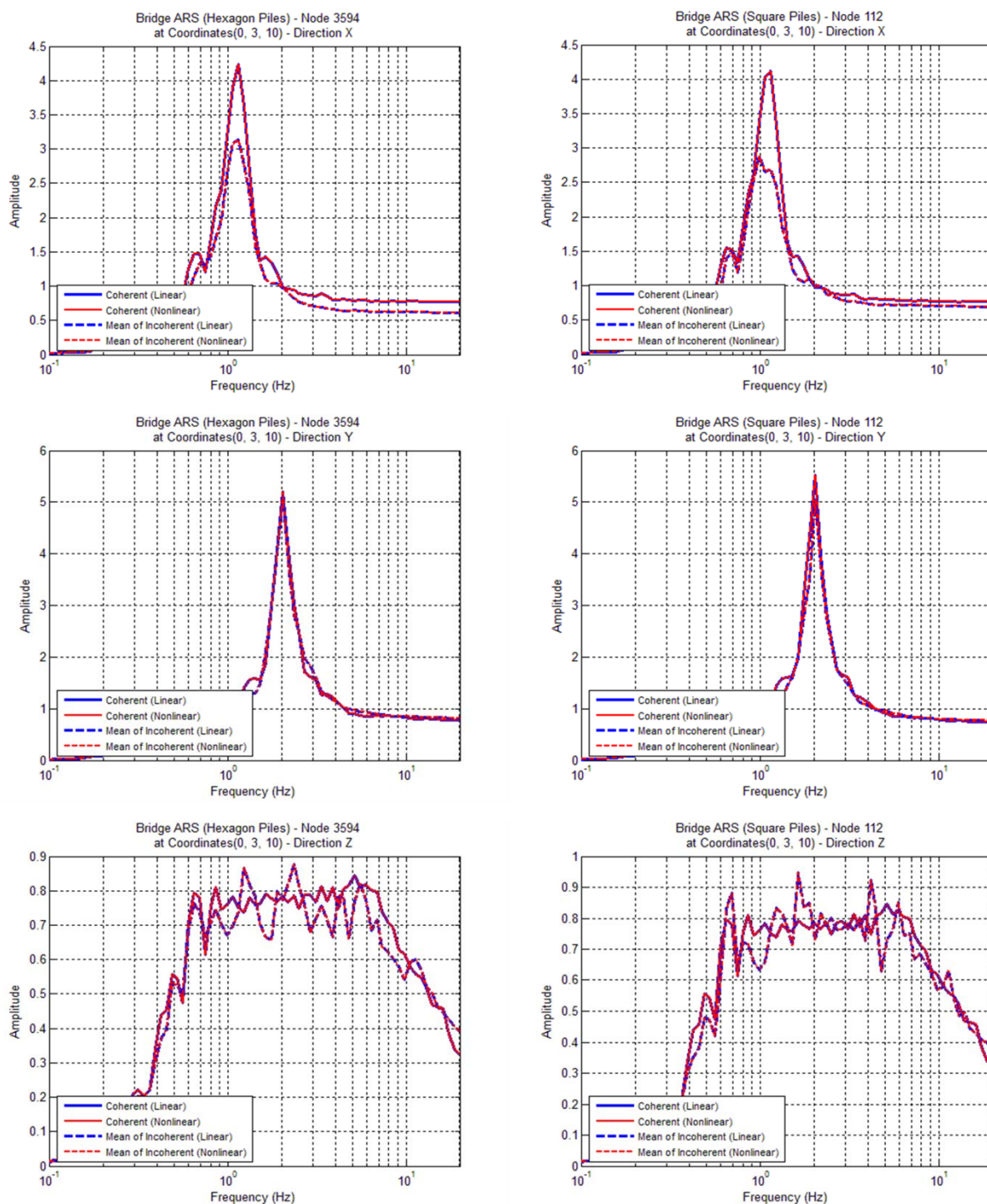
Figura din stanga sus este o vedere globală asupra modelului. În dreapta sus sunt prezentate doar elementele de beton, adică radierul și piloții. Figura din stânga jos include piloții de beton și volumul de sol din jurul modelului; se observă rețeaua de element finit mai sofisticată și forma hexagonală a piloților. În dreapta jos este prezentat volumul de teren excavat, care are câte un material diferit pentru fiecare strat.

Acest model va fi denumit mai departe SQUARE.



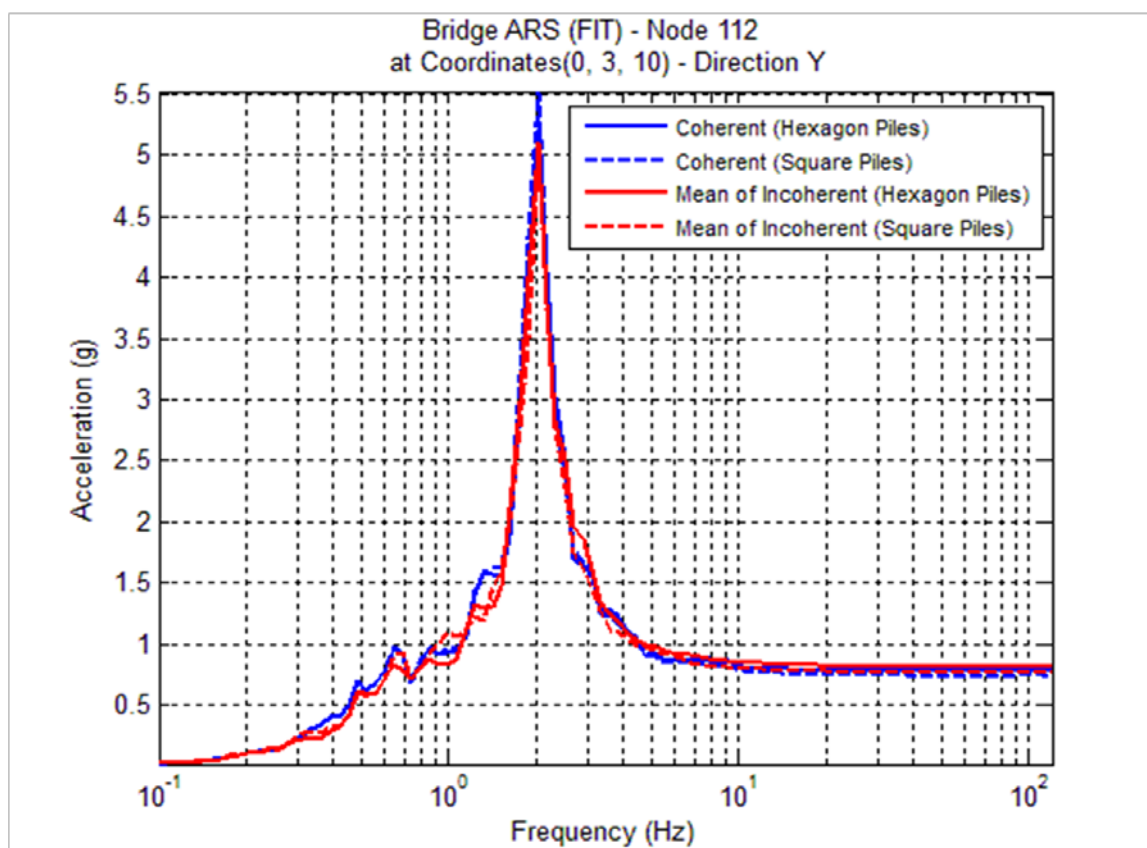
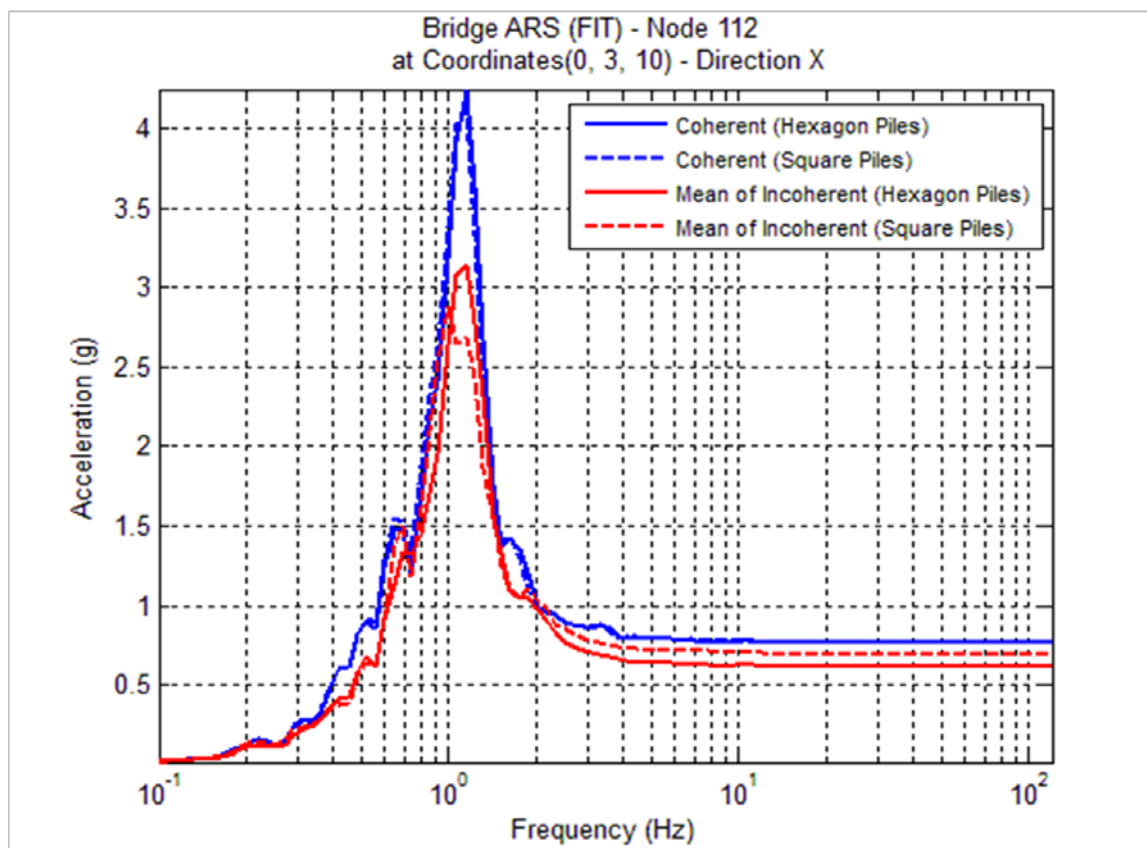
3.2.3. REZULTATE ȘI COMPARAȚII

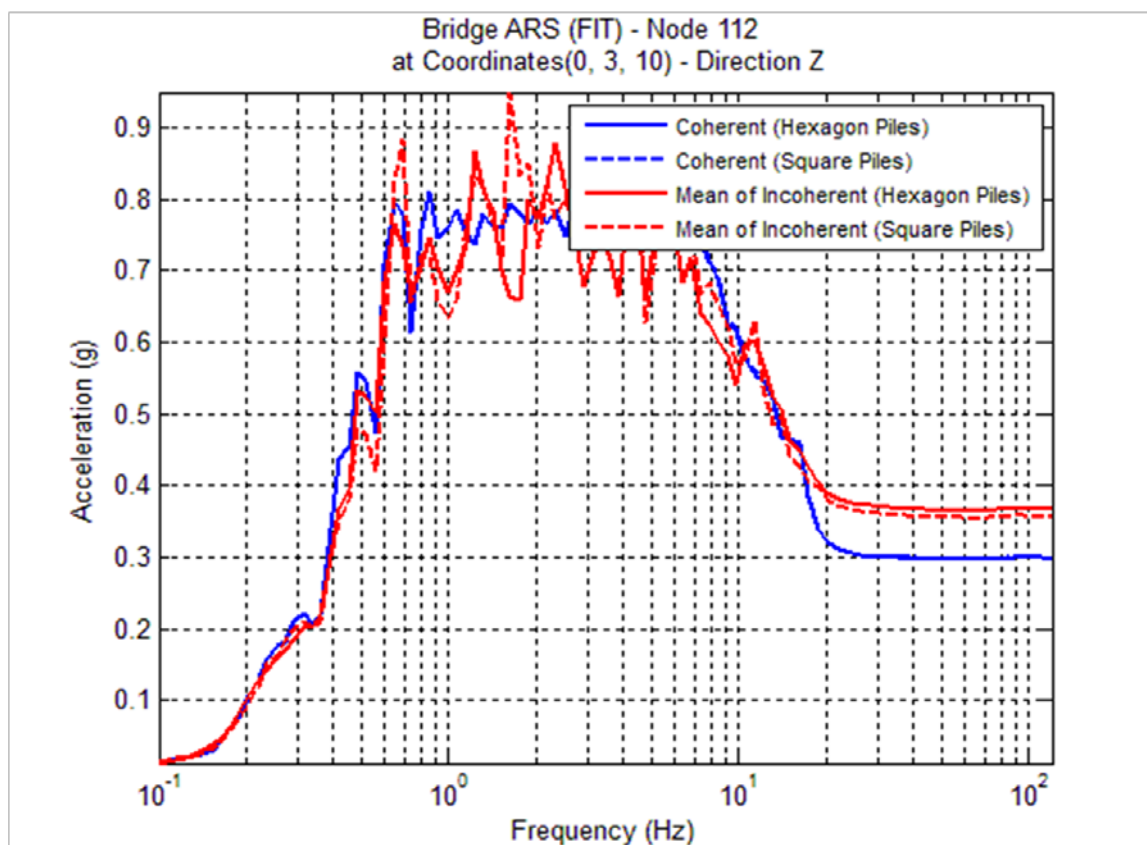
În figurile de mai jos sunt prezentate spectrele de răspuns în accelerații pentru un nod de la nivelul suprastructurii pe direcțiile X, Y și Z; pe coloana din stânga sunt prezentate spectrele pentru modelul HEXAGON, iar pe cea din dreapta pentru modelul SQUARE.



Se observă că în toate modelele analizele neliniare nu au un efect semnificativ. Acest lucru s-ar putea datora faptului că radierul este conectat direct cu câmpul liber, lucru ce fixează modelul și anulează posibilitatea de apariție a deformațiilor mari în elementele solide de sol din modelul structural în imediata apropiere a fundației.

Figurile următoare prezintă comparativ rezultatele analizelor neliniare pe cele două modele (HEXAGON și SQUARE) din input coerent și incoerent, pentru cele 3 direcții ortogonale.

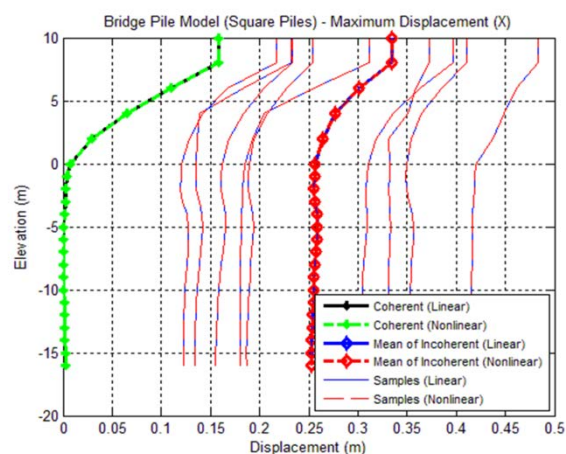
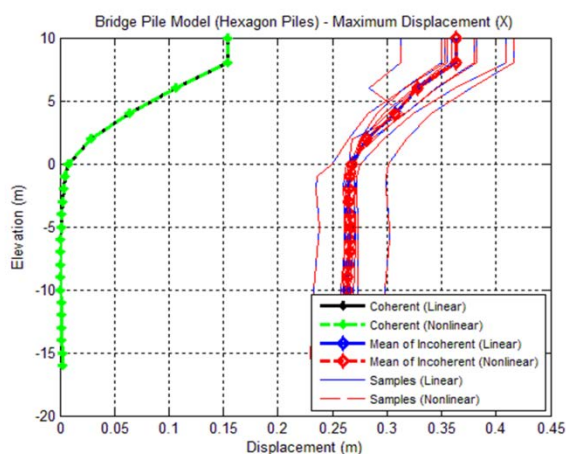


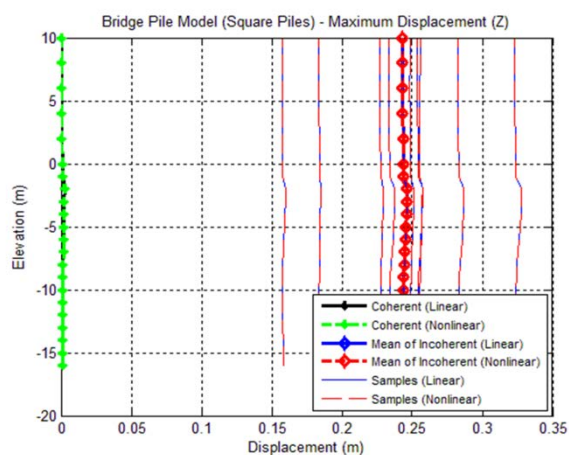
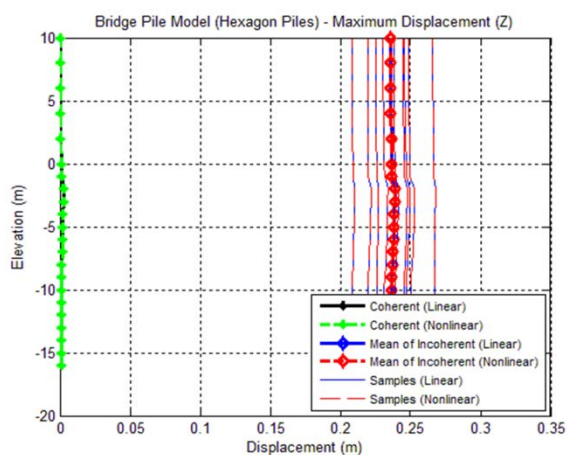
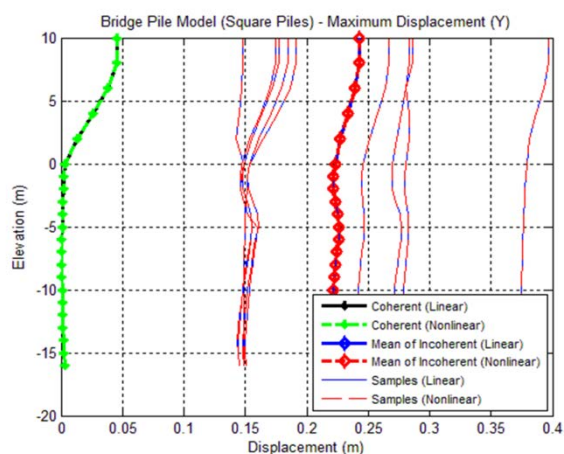
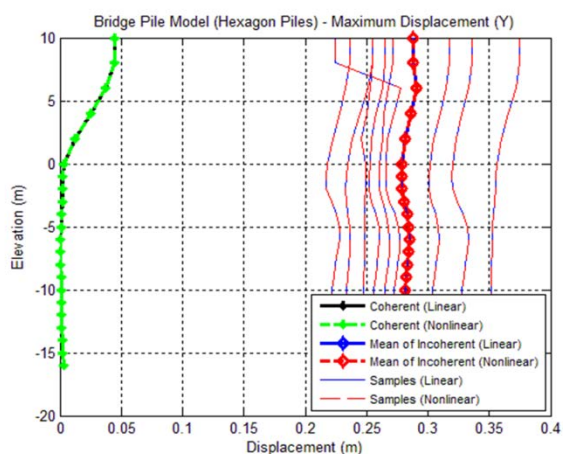


Se observă că analiza incoerentă reduce răspunsul structurii cu aproximativ 25% pe direcția X. Pe direcția Y, rezultatele sunt similare pe ambele modele de calcul, iar incoerența nu produce diferențe majore. Incoerența produce diferențe pe direcția Z, dar în procent mai mic de 10%.

Din cele 3 analize se observă că cele două modele HEXAGON și SQUARE au rezultate foarte apropiate, motiv pentru care în următoarea etapă se justifică folosirea modelului mai simplu SQUARE.

Figurile următoare prezintă comparativ deplasările pe înălțimea modelului (în piloți și pile) din analize coerente și incoerente pentru comportare liniară și neliniară. Pe coloana din stânga sunt prezentate rezultatele de pe modelul HEXAGON, iar pe cea din dreapta de pe modelul SQUARE.

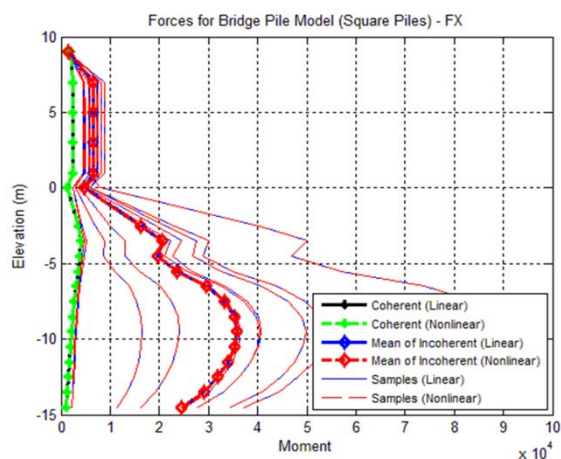
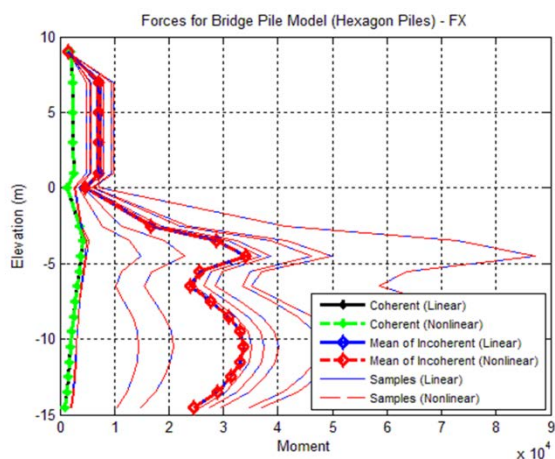




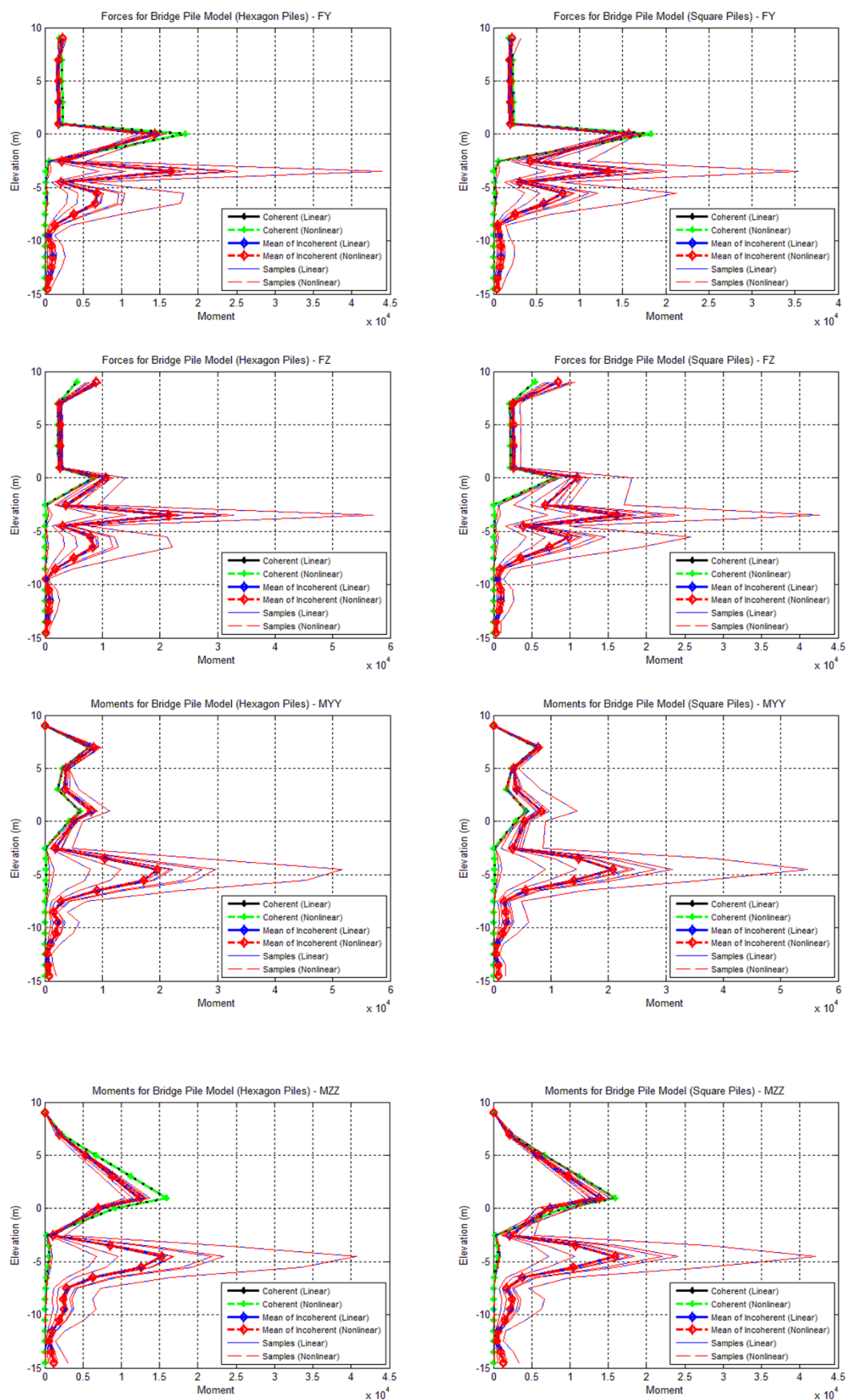
În toate analizele incoerente, se observă deplasările “de rigid” produse de undele seismice având lungimea de undă foarte mare. Pe ambele direcții orizontale, se observă faptul că deplasările relative dintre vârful și baza elevației pilei scad, iar deplasările relative din piloți cresc.

Modelele HEXAGON și SQUARE au rezultate similare și în cazul deplasărilor, ceea ce întărește convingerea că rețelele simplificate de element finit sunt direcția de continuare a cercetării.

Figurile următoare prezintă eforturile maxime în piloți / pile din analize coerente și incoerente, pentru modele cu comportare liniară și neliniară. Pe coloana din stânga sunt prezentate rezultatele de pe modelul HEXAGON, iar pe cea din dreapta de pe modelul SQUARE.



Se observă faptul că forțele axiale din piloți au valori foarte mari în continuare, iar analizele neliniare nu reduc eforturile aproape deloc.



În piloți, eforturile din încărcări transversale cresc foarte mult datorită fenomenului de incoerență. Acest fenomen se explică prin deformațiile diferențiale puternice ce apar pe lungimea pilotului. În cazul pilelor incoerența nu are un efect major.

3.2.4. CONCLUZII

Modelul cu rețeaua de element finit simplificată (SQUARE) s-a comportat foarte bine în toate analizele. Se recomandă continuarea studiului cu acest model, datorită beneficiilor legate de dimensiunea modelului mult mai mică și timpii de rulare reduși considerabil.

Se observă că problema forțelor axiale foarte mari din piloți nu s-a rezolvat nici prin introducerea pământului cu comportare neliniară în imediata apropiere a fundației. Totuși, pentru a rezolva această situație, în următoarea etapă se va investiga posibilitatea includerii fenomenului de lunecare între piloții de beton și pământul din jurul lor.

4. REFERINȚE

- Contiu M, Ghiocel DM, Cretu D (2014) Incoherent soil-structure interaction (ssi) effects for a 242m long concrete bridge founded on deep piles, Second European conference on earthquake engineering and seismology (2ECEES), Istanbul, Turkey
- Contiu M, Ghiocel DM, Cretu D (2018) Soil-structure interaction and motion incoherency effects on a concrete bridge with deep foundations, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 399, 3rd China-Romania Science and Technology Seminar (CRSTS 2018), Brasov, Romania
- Ghiocel DM (2007) Stochastic and Deterministic Approaches for Incoherent Seismic SSI Analysis as Implemented in ACS SASSI, Appendix C, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA and US Department of Energy, Germantown, D, EPRI Report TR-1015111, USA
- Ghiocel DM (2013) ACS SASSI NQA Version 2.3.0 - An Advanced Computational Software for 3D Dynamic Analysis Including Soil Structure Interaction, User Manuals, Technical Reports, GP Technologies, Inc., Rochester, New York, USA
- Abrahamson N (2006) Spatial Coherency for Soil-Structure Interaction, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA and US Department of Energy, Germantown, MD, EPRI TR-1014101
- Abrahamson N (2007) Effects of Seismic Motion Incoherency Effects, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA and US Department of Energy, Germantown, MD, EPRI TR-1015110
- Seed HB, Idriss IM (1970) Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley California, Report EERC 70-10, USA
- Mylonakis G, Gazetas G, Nikolaou S, Michaelides O (2000) "The role of soil on the collapse of 18 piers of the Hanshin expressway in the Kobe earthquake", *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 30 January - 4 February, 1074