

ACCOPIAMENTO DEGLI EFFETTI TOPOGRAFICI E STRATIGRAFICI SULLA RISPOSTA SISMICA ATTRAVERSO SCHEMI 3D: ANALISI PRELIMINARI.

Gaetano Falcone, Gaetano Elia, Francesco Cafaro

*DICATECh - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica,
Politecnico di Bari, via Orabona 4, Bari, 70125, Italy*

gaetano.falcone@poliba.it, gaetano.elia@poliba.it, francesco.cafaro@poliba.it

Sommario

Lo studio della risposta sismica locale in condizioni geomorfologiche complesse richiede l'utilizzo di codici di calcolo che permettono l'implementazione di geometrie bi- e tri-dimensionali. Infatti, uno schema geometrico inadeguato a rappresentare la reale topografia o strutture morfologiche sepolte può determinare sia la sovrastima che la sottostima della previsione dello scuotimento sismico atteso in superficie. Questa nota riporta i risultati preliminari di analisi di risposta sismica locale tri-dimensionali relative all'area del comune di Ferrandina (MT) prossima alla galleria Alvaro. A partire dal DTM regionale con dimensione di cella 5 m, sono stati generati 2 modelli CAD caratterizzati da diversa accuratezza rispetto alla topografia ottenuta con il DTM. Inoltre, con riferimento alla condizione di semispazio omogeneo, la velocità di propagazione delle onde di taglio è stata posta pari a 1000 m/s e 400 m/s. I risultati, riportati in termini di profili del fattore di amplificazione dell'accelerazione di picco al piano campagna e spettri di risposta, dimostrano che nel caso di materiale soffice il modello meno accurato sottostima lo scuotimento sismico in superficie che si ottiene con il modello più raffinato.

1. Introduzione

Lo scuotimento sismico in superficie dipende dalle condizioni topografiche e stratigrafiche locali. Lo studio della risposta sismica locale, RSL, può essere basato su uno schema geometrico monodimensionale (1D) per quei siti rispetto ai quali sono attesi fenomeni di amplificazione stratigrafica, cioè quei siti per i quali è accettabile considerare il piano campagna e gli eventuali passaggi di strato tutti orizzontali (Gazetas, 1982; Régnier et al., 2018). Invece, in presenza di topografia complessa o di eventuali geometrie sepolte, è necessario generare modelli bi- e tri-dimensionali (rispettivamente 2D e 3D) da implementare nel codice di calcolo per la RSL (Falcone et al., 2018; Geli et al., 1988; Jibson, 1987; Moczo et al., 2018; Rizzitano et al., 2014). Con riferimento a geometrie semplificate 2D, in letteratura sono disponibili soluzioni che permettono di stimare in via preliminare l'effetto topografico atteso sulla RSL in funzione di parametri che in maniera sintetica rappresentano la geometria in esame e il materiale che caratterizza il sito (Bouckovalas & Papadimitriou, 2005; Gatmiri & Arson, 2008). Tuttavia, con riferimento a topografie particolarmente complesse che richiedono la realizzazione di modelli 3D, è opportuno eseguire un'analisi parametrica per valutare l'effetto che l'accuratezza dello stesso modello 3D ha sui risultati di RSL. In questo contesto, con riferimento all'area di studio (Ferrandina, MT), sono state eseguite analisi di RSL 3D attraverso il codice di calcolo PLAXIS. I risultati sono mostrati in termini di spettri di risposta al piano campagna e di profili del fattore di amplificazione dell'accelerazione di picco, AF_{PGA} , determinato secondo l'equazione seguente:

$$AF_{PGA} = PGA_o \setminus PGA_r \quad (1)$$

dove i pedici “o” ed “r” si riferiscono, rispettivamente, al segnale ottenuto al piano campagna tramite l’analisi di RSL e a quello di riferimento.

2. Caso di studio

In questa sezione sono descritti l’area oggetto di studio, la pericolosità sismica di riferimento ed il modello numerico implementato per le simulazioni della RSL.

2.1 Area di studio: Ferrandina (MT)

L’area in esame circoscrive la galleria Alvaro caratterizzata da due canne di lunghezza circa 620 m e 690 m (Fig. 1a-b). La Fig. 1b mostra il DTM regionale con dimensione di cella paria a 5 m. È interessante osservare che la topografia di tale area risulta estremamente complessa sia in direzione SE-NO, cioè sub-parallela all’asse longitudinale della galleria, che SO-NE, cioè trasversale all’asse della stessa galleria.

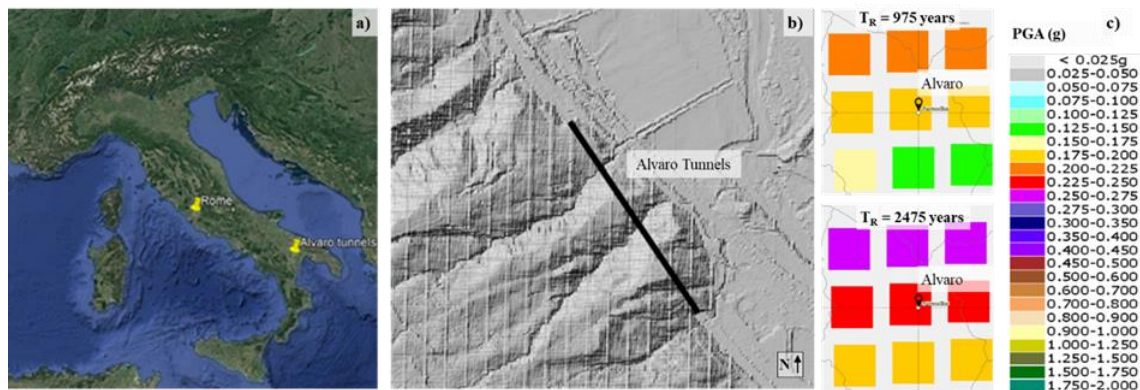


Fig. 1. a) posizione, b) DTM e c) pericolosità sismica di riferimento MPS04-S1 dell’area oggetto di studio.

2.2 Pericolosità sismica di riferimento

Per l’area in esame è stata considerata la pericolosità sismica di riferimento MPS04-S1 (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>). La Fig. 1c mostra i valori di PGA per i tempi di ritorno, T_R , pari a 975 e 2475 anni. Considerato che l’area è interessata da una galleria, si è fatto riferimento ad un $T_R = 1898$ anni per la selezione di accelerogrammi reali. I parametri sismici per la determinazione degli spettri di risposta secondo le norme tecniche per le costruzioni, NTC18, sono elencati in Tabella 1. La Fig. 2 mostra lo spettro di risposta di riferimento per suolo di categoria A e classe topografica T1. Nella stessa figura sono riportati gli spettri di risposta di due accelerogrammi selezionati come segnali di riferimento per le simulazioni numeriche della RSL, cioè considerati registrati in superficie in condizione di piano campagna orizzontale. I due segnali sono relativi alle componenti NS e EO registrate dalla stazione di Cascia (Perugia, Umbria, Italy) il 14/10/1997 e riferite all’evento denominato UMBRIA-MARCHE 3RD SHOCK (https://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_32/#/station/IT/CSC). Entrambi i segnali sono stati scalati al valore di PGA pari a 0.24 g, previsto per il tempo di ritorno di 1898 anni (Tabella 1). Infine, i due segnali sono stati selezionati attraverso il codice IN-SPECTOR (Acunzo et al., 2014) poiché caratterizzati dal valore D_{rms} inferiore rispetto ai segnali del database disponibile al link <http://esse1-gis.mi.ingv.it/> per siti di categoria di suolo A e B. Il valore di D_{rms} è ottenuto tramite l’equazione:

$$D_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_{ref}(T_i)}{PGA_{ref}} - \frac{Sa_{NTC18}(T_i)}{PGA_{NTC18}} \right)^2} \quad (2)$$

dove N è il numero di periodi in corrispondenza dei quali sono specificate le forme spettrali, $SA_{ref}(T_i)$ è l'accelerazione spettrale al periodo T_i relativa all'accelerogramma selezionato, $SA_{NTC18}(T_i)$ è l'accelerazione spettrale dello spettro obiettivo al medesimo periodo, PGA_{ref} e PGA_{NTC18} sono rispettivamente l'accelerazione di picco dell'accelerogramma e il punto di ancoraggio dello spettro obiettivo.

T_R (anni)	a_g (g)	F_0 (-)	T_c^* (s)
975	0.20	2.51	0.35
2475	0.26	2.55	0.36
1898	0.24	2.54	0.35

Tabella 1. Parametri sismici per la determinazione degli spettri di risposta NTC18. I valori relativi a $T_R = 1898$ anni sono stati determinati per interpolazione.

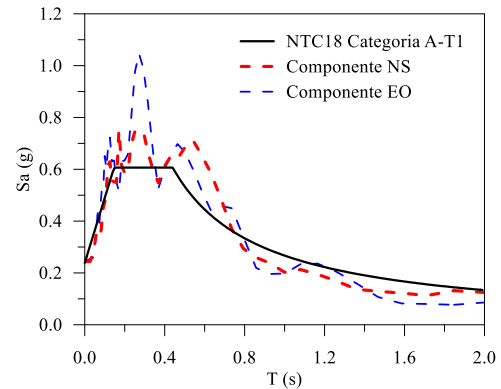


Fig. 2. Spettri di risposta in termini di pseudo-accelerazioni da NTC18 per $T_R = 1898$ anni e spettri selezionati per analisi di RSL.

2.3 Modello numerico

Le analisi di RSL sono state eseguite con il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 3D (Brinkgreve et al., 2022). Al fine di evidenziare esclusivamente l'accoppiamento dell'amplificazione topografica e stratigrafica in assenza di geometrie sepolte, il valore della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s , e dello smorzamento, D , sono stati considerati costanti con la profondità e, per semplicità, indipendenti dalla deformazione di taglio indotta. Inoltre, a partire dal DTM di Fig. 1b, sono stati generati i due modelli 3D mostrati in Fig. 3.

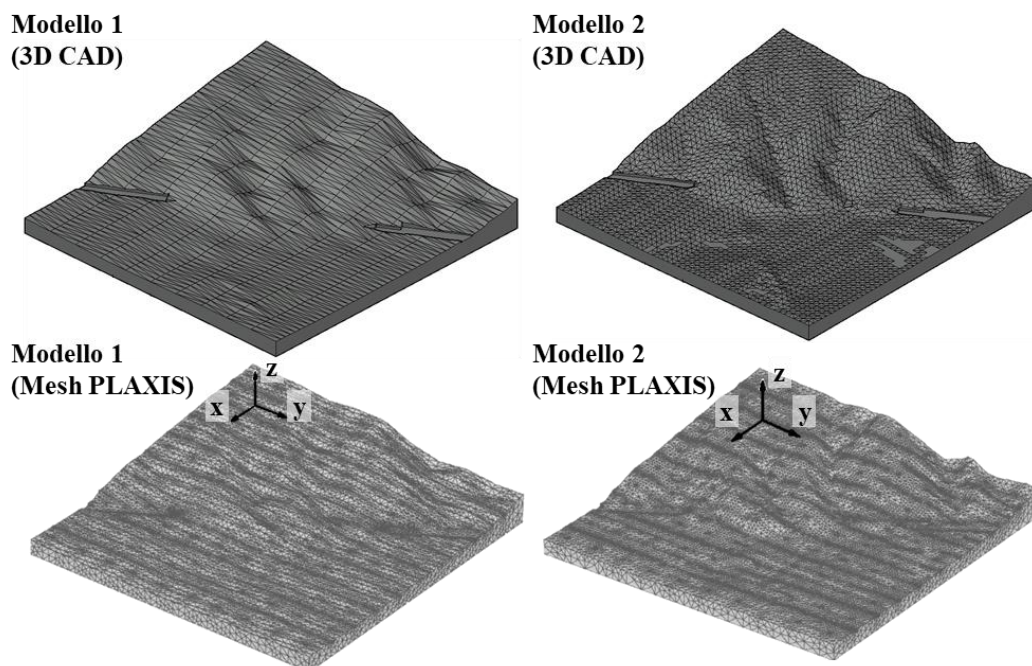


Fig. 3. Modelli geometrici e rispettive mesh implementate nel codice PLAXIS 3D per le analisi di RSL.

Il modello 1 e il modello 2 sono, rispettivamente, meno e più accurato rispetto alla topografia dell'area di interesse. È opportuno osservare che il numero di elementi ($\sim 126,000$), il numero di nodi ($\sim 140,000$) e la dimensione media degli elementi (~ 15 m) delle due *mesh* (Fig. 3) sono confrontabili tra di loro al fine di evitare un effetto di discretizzazione della *mesh* sui risultati delle analisi di RSL. In entrambi i modelli, inoltre, sono state implementate le due canne della galleria Alvaro. Tuttavia, la loro descrizione non è oggetto di questa nota. Per ogni modello 3D, sono stati realizzati due modelli numerici: uno caratterizzato da $V_S = 1000$ m/s e l'altro da $V_S = 400$ m/s. Il valore di D è stato assunto sempre pari a 0.1%. Con riferimento alle condizioni al contorno, per i bordi verticali è stata attivata la condizione *free-field* e per la base del modello numerico la condizione *compliant base*. Infine, le componenti NS ed EO dell'input sismico sono state applicate contemporaneamente alla base del modello, rispettivamente nella direzione x e y del sistema di riferimento indicato in Fig. 3.

3. Risultati

I risultati delle analisi di risposta sismica locale sono riportati in questo paragrafo in termini di profili di AF_{PGA} (Fig. 4) lungo le direzioni x e y secondo il sistema di riferimento di Fig. 3 e spettri di risposta in termini di pseudo-accelerazioni (Fig. 5). In particolare, il valore di AF_{PGA_x} , definito secondo l'equazione (1), è dato dal rapporto tra il segnale ottenuto al piano campagna del modello numerico in direzione x e la componente EO del segnale di riferimento, mentre AF_{PGA_y} è dato dal rapporto tra il segnale ottenuto al piano campagna del modello numerico in direzione y e la componente NS del segnale di riferimento.

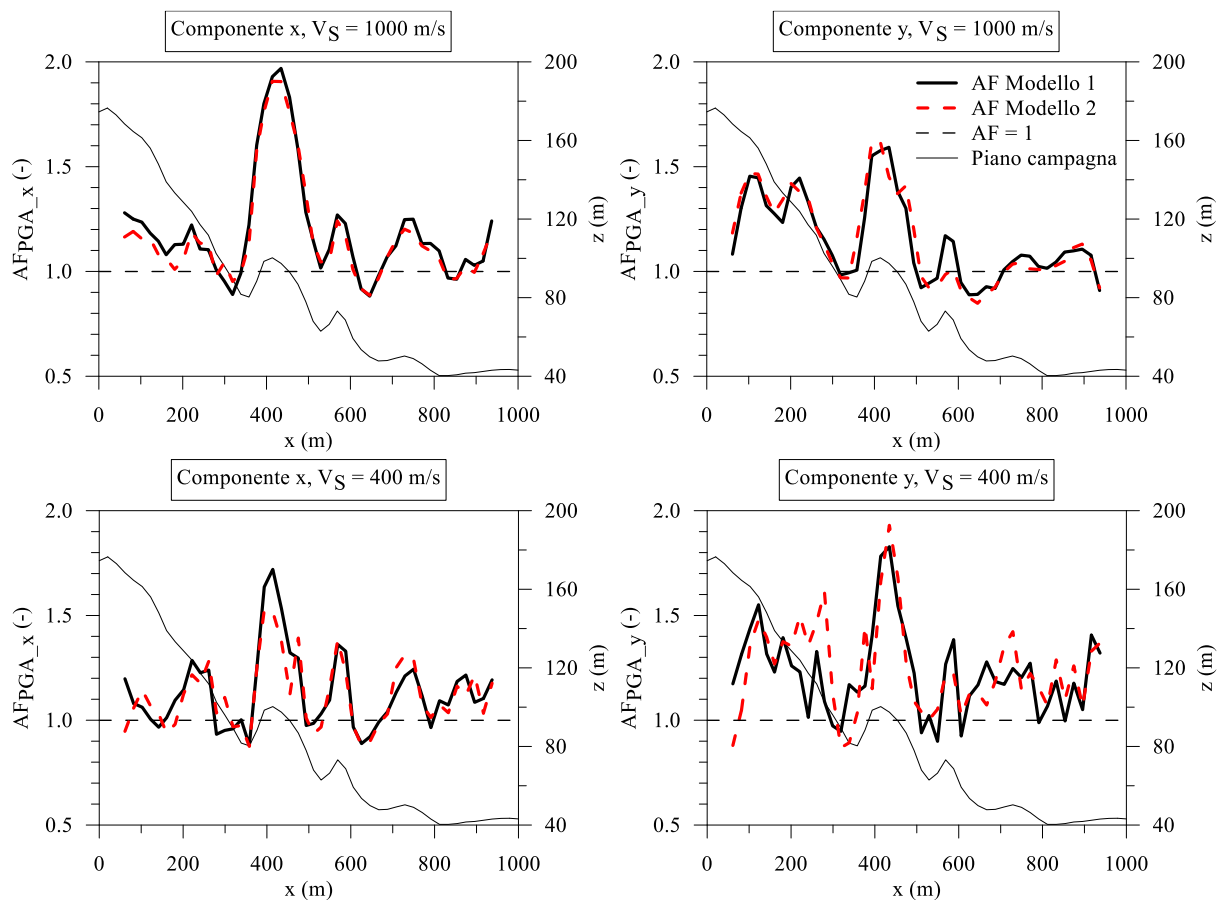


Fig. 4. Profili di AF_{PGA} .

Con riferimento ad una sezione verticale posta ad $y = 500$ m (si veda origine del sistema di riferimento di Fig. 3), nel caso in cui per il terreno è stata considerata $V_S = 1000$ m/s, l'accuratezza del modello 3D nel descrivere la complessità della topografia ha un effetto trascurabile sul profilo di AF_{PGA_x} mentre il modello 1 sovrastima AF_{PGA_y} rispetto al modello 2 per valori di x tra 500 e 600 m. Invece, per $V_S = 400$ m/s l'accuratezza del modello 3D assume un ruolo fondamentale soprattutto per la stima di AF_{PGA_y} .

I risultati di dettaglio delle analisi di RSL sono mostrati in termini di spettri di risposta in pseudo-accelerazioni in Fig. 5 con riferimento a un punto in superficie ad $x = 300$ m. Anche in questo si conferma quanto sopra riportato. Nel caso di un deposito con $V_S = 1000$ m/s l'accuratezza del modello 3D nel descrivere la complessità della topografia ha un effetto trascurabile sullo scuotimento sismico in superficie mentre per $V_S = 400$ m/s il modello 1 sottostima le accelerazioni spettrali per l'intervallo di periodi 0.05-0.3 s.

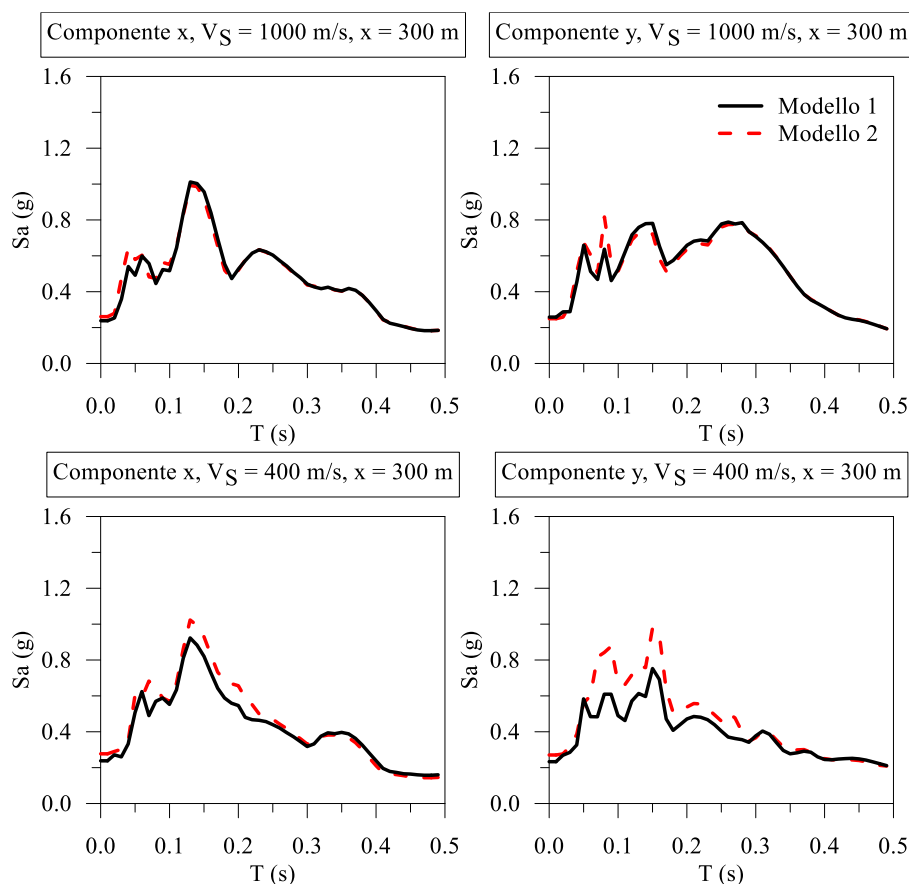


Fig. 5. Spettri di risposta in termini di pseudo-accelerazioni da NTC18 per $T_R = 1898$ anni e spettri selezionati per analisi RSL.

4. Conclusioni

Nella presente nota sono riportati i risultati preliminari di uno studio parametrico della risposta sismica locale in condizioni topografiche complesse. A partire dal DTM regionale con dimensione di cella 5 m relativo al comune di Ferrandina (MT) sono stati realizzati due modelli tri-dimensionali caratterizzati da diversa accuratezza rispetto alla topografia ottenuta dal DTM. Con riferimento all'ipotesi di materiale omogeneo, la velocità di propagazione delle onde di taglio, costante con la profondità, è stata assunta pari a 1000 m/s o pari a 400 m/s. Di conseguenza, sono stati analizzati 4 modelli numerici 3D, alla cui base sono state applicate contemporaneamente le due componenti orizzontali del segnale di riferimento. I risultati in termini di fattori di amplificazione (rapporto tra segnale al piano

campagna del modello numerico e segnale di riferimento) dimostrano che, per l'area oggetto di studio, con riferimento al caso $V_s = 1000$ m/s l'accuratezza nel descrivere la topografia ha un effetto trascurabile, invece, per $V_s = 400$ m/s è necessario un modello 3D in grado di cogliere le complessità geometriche del piano campagna in tutte le direzioni.

In futuro, l'analisi parametrica sarà estesa considerando ulteriori modelli con diverso grado di accuratezza, includendo l'eterogeneità stratigrafica del sottosuolo per come dedotta da indagini di prossima realizzazione e selezionando ulteriori segnali di riferimento. I dati raccolti dal futuro studio parametrico potranno essere utili al fine di allenare tecniche alternative e speditive sia per la previsione dello scuotimento sismico sia per la progettazione di sistemi di supporto alla decisione per la gestione di strutture e infrastrutture.

Ringraziamenti

La ricerca è stata finanziata con i fondi del Programma MIUR PON R&I 2014-2020 (progetto MITIGO, ARS01_00964). Si ringraziano inoltre i Proff. Caterina Di Maio e Roberto Vassallo (Università degli Studi della Basilicata), i Dott. Giampiero D'Ecclesiis e Ciro Mallardo (ANAS - Compartimento Basilicata) ed i Proff. Angelo Amorosi e Daniela Boldini (Università di Roma "La Sapienza") per il prezioso supporto.

Bibliografia

- Acunzo, G., Pagliaroli, A., & Scasserra, G. (2014). "IN-SPECTOR: un software di supporto alla selezione di accelerogrammi naturali spettrocompatibili per analisi geotecniche e strutturali". Proc. GNGTS - 2014.
- Bouckovalas, G. D., & Papadimitriou, A. G. (2005). "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7–10), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.008>.
- Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M., et al. (2022). PLAXIS 3D CONNECT Edition V22 Update 1 Manual. Available online: www.plaxis.nl (accessed on 01 July 2022).
- Falcone, G., Boldini, D., & Amorosi, A. (2018). "Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109, 33–45. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2018.02.026>.
- Gatmiri, B., & Arson, C. (2008). "Seismic site effects by an optimized 2D BE/FE method II. Quantification of site effects in two-dimensional sedimentary valleys", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(8), 646–661. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2007.09.002>.
- Gazetas, G. (1982). "Vibrational characteristics of soil deposits with variable wave velocity", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 6(1), 1–20. <https://doi.org/10.1002/nag.1610060103>.
- Geli, L., Bard, P.-Y., & Jullien, B. (1988). "The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1).
- Jibson, R. W. (1987). Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability. Open-file Report. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr87268>.
- Moczo, P., Kristek, J., Bard, P. Y., Stripajová, S., Hollender, F., Chovanová, Z., Kristeková, M., & Sicilia, D. (2018). "Key structural parameters affecting earthquake ground motion in 2D and 3D sedimentary structures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(6), 2421–2450. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0345-5>.
- Régnier, J., Bonilla, L., Bard, P., Bertrand, E., Hollender, F., Kawase, H., Sicilia, D., Arduino, P., Amorosi, A., Asimaki, D., Boldini, D., Chen, L., Chiaradonna, A., DeMartin, F., Elgamal, A., Falcone, G., Foerster, E., Foti, S., Garini, E., ... Verrucci, L. (2018). "PRENOLIN: International Benchmark on 1D Nonlinear Site-Response Analysis—Validation Phase Exercise", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 876–900. <https://doi.org/10.1785/0120170210>.
- Rizzitano, S., Cascone, E., & Biondi, G. (2014). "Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 66–84. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2014.09.003>.