

UN METODO SEMPLIFICATO PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI BIDIMENSIONALI SULLA RISPOSTA SISMICA LOCALE DI VALLI ALLUVIONALI

Giorgio Andrea Alleanza

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli studi di Napoli Federico II
giorgioandrea.alleanza@unina.it

Anna d'Onofrio

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli studi di Napoli Federico II
donofrio@unina.it

Francesco Silvestri

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli studi di Napoli Federico II
francesco.silvestri@unina.it

Sommario

La risposta sismica locale di una valle alluvionale è influenzata da una complessa combinazione di fattori geometrici e stratigrafici, la cui ripercussione sul moto in superficie non è semplicemente sintetizzabile negli approcci normativi, come invece accade per gli effetti stratigrafici 1D e topografici. Nel presente studio si riportano i risultati ottenuti da un'estesa analisi parametrica su modelli di valle superficiale di forma trapezia, finalizzati alla valutazione dell'influenza sul moto in superficie del fattore di forma, dell'angolo d'inclinazione dei bordi, del contrasto d'impedenza e della frequenza del moto sismico di riferimento. I risultati sono stati sintetizzati definendo un fattore di amplificazione di valle, denominato VAF, attraverso il quale quantificare l'amplificazione della risposta bidimensionale lungo la superficie rispetto a quella monodimensionale in corrispondenza della verticale di centro valle. I risultati delle analisi parametriche presentate costituiscono il punto di partenza per la definizione di abachi semplificati che consentano di tener conto degli effetti di valle anche nella normativa tecnica.

1. Introduzione

Le modifiche al moto sismico in una valle alluvionale sono generalmente connesse alla geometria bi-dimensionale ed in particolare al contatto inclinato fra la formazione di base e gli strati deformabili. Nelle aree prossime ai bordi laterali si hanno, infatti, fenomeni di focalizzazione e di modifica delle onde sismiche causate dall'interazione fra i campi d'onda diretti, riflessi e rifratti. Si generano, inoltre, onde di superficie che si propagano in direzione orizzontale all'interno della valle. In particolare, si ha che l'incidenza di onde SH produce onde di Love (Aki & Larner, 1970; Bard & Bouchon, 1980a) mentre dalla combinazione di onde P e SV si generano onde di Rayleigh (Bard & Bouchon, 1980b). La particolare geometria della valle e il contrasto d'impedenza fra terreno deformabile e basamento roccioso danno luogo, inoltre, all'intrappolamento di tali onde all'interno del bacino alluvionale e, conseguentemente, a un incremento dell'ampiezza e della durata del moto sismico in superficie. Quest'ultimo quindi risulta influenzato principalmente dalla geometria del bacino (Figura 1), dalla sequenza stratigrafica dei materiali che costituiscono la valle e dalle caratteristiche del segnale sismico al *bedrock*.

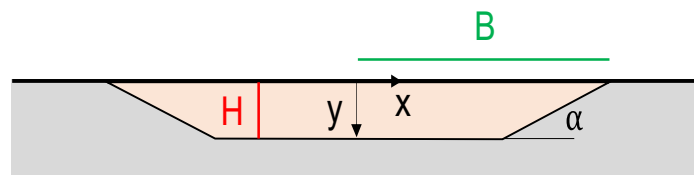


Fig. 1. Schema geometrico semplificato di valle alluvionale trapezia

2. Modello geotecnico

L'influenza della geometria bidimensionale, dei parametri meccanici che caratterizzano i terreni e delle caratteristiche del moto sismico sulla risposta sismica locale dei bacini alluvionali è stata valutata nel presente studio attraverso un cospicuo numero di analisi parametriche (oltre 2000) svolte su diversi modelli di valle trapezia (Figura 1). I parametri presi in considerazione nelle analisi sono: il fattore di forma, definito come il rapporto fra lo spessore dello strato deformabile, H , e la semilarghezza della valle, B (Bard & Bouchon, 1980a,b); l'inclinazione dei bordi, α (Zhu & Thambiratnam, 2016); il contrasto d'impedenza, I , fra il substrato roccioso ed il terreno deformabile (Bard & Bouchon, 1985); le proprietà non lineari e dissipative dei materiali (Gelagoti et al., 2010); il rapporto fra la frequenza mediana del moto sismico di riferimento, f_m , e quella di risonanza monodimensionale della verticale di terreno in corrispondenza del centro valle, $f_{0,1D}$ (Alleanza et al., 2019).

Nelle Tabelle 1-2 sono riportati rispettivamente i valori delle proprietà geometriche e meccaniche adottate nelle analisi. Lo spessore della valle è stato assunto costante e pari a 100 m in tutte le analisi, mentre la larghezza è stata fatta variare in modo che il fattore di forma assumesse cinque diversi valori tra 0.05 e 0.25. Per ciascuno di essi è stata valutata l'influenza dell'inclinazione dei bordi, considerando 6 diversi angoli compresi fra 90° e $\arctan H/B$, cioè quello corrispondente a una valle di forma triangolare. Tutte le analisi sono state eseguite assumendo un modello visco-elastico lineare per i terreni; avendo assegnato al substrato lapideo un valore costante di velocità delle onde di taglio, V_S , pari a 800 m/s, la velocità del deposito deformabile è stata fatta variare fra 100 e 580 m/s, in modo da indagare gli intervalli di velocità caratteristici delle categorie di sottosuolo B, C e D, così come definite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC18). I valori dei rapporti tra le velocità, C_V , e dei fattori di forma presi in considerazione nelle analisi sono tali da classificare le valli come superficiali, secondo il criterio indicato da Bard & Bouchon (1985). Il valore dello smorzamento iniziale, D_0 , è stato assunto costante per il *bedrock* e pari a 0.5% mentre per il deposito deformabile D_0 è stato assunto variabile fra 5% e 1%, in misura inversamente proporzionale al rispettivo valore di V_S .

Per ogni modello è stata, inoltre, valutata la risposta sismica della colonna mono-dimensionale in corrispondenza del centro valle, considerandola rappresentativa della sola amplificazione stratigrafica, da confrontare con quella ottenuta dai modelli bi-dimensionali. In tal modo è stato possibile distinguere gli effetti di amplificazione stratigrafica da quelli associati alla geometria 2D.

Il moto sismico di riferimento utilizzato nelle analisi è un segnale con forma d'onda tipo *Ricker* con frequenze mediane variabili. Esse sono state scelte in modo che il rapporto fra la lunghezza d'onda incidente ($\lambda_m = V_S / f_m$) e lo spessore di terreno variasse fra 20 e 0.5 o, equivalentemente, che il rapporto tra f_m e $f_{0,1D}$ fosse compreso tra 0.2 e 8. In tal modo è stato possibile analizzare anche la dipendenza della risposta del sistema al variare del contenuto in frequenza del segnale sismico di riferimento. Le analisi numeriche bi-dimensionali sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo alle differenze finite FLAC 8.0 (Itasca Consulting Group, 2016) mentre quelle mono-dimensionali adottando il codice STRATA (Kottke & Rathje, 2008). Trattandosi di procedure operanti rispettivamente nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza, si è preventivamente verificata la coerenza dei risultati ottenuti con entrambi i codici di analisi su modelli monodimensionali identici in termini di legame costitutivo (visco-elastico lineare), condizioni al contorno e di discretizzazione geometrica (Alleanza & Chiaradonna, 2018).

Tab. 1. Parametri geometrici delle valli analizzate

Spessore H (m)	Larghezza 2B (m)	Fattore di forma H/B	Inclinazione dei bordi α (°)
100	4000	0.05	90/60/45/30/15/Cuneo
	2000	0.10	
	1340	0.15	
	1000	0.20	
	800	0.25	

Tab. 2. Proprietà meccaniche

Velocità delle onde S		Peso dell'unità di volume		Coefficiente di Poisson		Smorzamento iniziale		Contrasto d'impedenza	Contrasto di velocità
Substrato $V_{s,r}$ (m/s)	Terreno V_s (m/s)	Substrato γ_r (kN/m ³)	Terreno γ (kN/m ³)	Substrato ν_r	Terreno ν	Substrato $D_{0,r}$ (%)	Terreno D_0 (%)	I	C_v
800	100	22	19	0.33	0.33	0.5	5.0	9.26	8.00
	130						3.8	7.13	6.15
	180						2.8	5.15	4.44
	270						1.9	3.43	2.96
	360						1.4	2.57	2.22
	580						1.0	1.60	1.38

3. Risultati

In definitiva, sono stati considerati 180 modelli di sottosuolo, ai quali sono stati applicati 12 segnali sismici, per un totale di 2160 analisi effettuate. Dagli accelerogrammi orizzontali e verticali ottenuti in corrispondenza dei punti lungo la superficie della *mesh* sono stati, quindi, calcolati gli spettri di risposta. È stato dapprima definito un fattore di amplificazione, AG , come:

$$AG\left(T, \frac{x}{B}\right) = \frac{S_{a,s}\left(T, \frac{x}{B}\right)}{S_{a,r}(T)} \quad (1)$$

in cui $S_{a,s}$ e $S_{a,r}$ sono le ordinate spettrali degli accelerogrammi ottenuti rispettivamente in superficie e al *bedrock*. Al fine di isolare i soli effetti geometrici bi-dimensionali, è stato definito quindi un ulteriore coefficiente di amplificazione, $AG_{2D/1D}$, come rapporto tra i fattori AG calcolati nelle analisi bi- e mono-dimensionali ($x=0$):

$$AG_{2D/1D}\left(T, \frac{x}{B}\right) = \frac{AG_{2D}\left(T, \frac{x}{B}\right)}{AG_{1D}(T, 0)} \quad (2)$$

In Figura 2 i risultati delle analisi sono riportati in termini di rapporto $AG_{2D/1D}$ (rappresentato in scala di colore) ottenuto per diversi valori di H/B , α , I e $f_m/f_{0,1D}$. Si noti che le ascisse riportate in figura sono adimensionalizzate rispetto alla semi-larghezza della valle, in modo da poter confrontare valli con H/B diversi, mentre i periodi rappresentati in ordinata sono normalizzati rispetto a $T_{0,1D}$, e rappresentati fino al valore $T/T_{0,1D}$ pari a 1 perché per valori superiori non sono stati osservati significativi effetti di amplificazione. Nelle Figure 2a,b è mostrato un confronto tra i risultati ottenuti per due valli con H/B pari a 0.05 (Figura 2a) e 0.25 (Figura 2b), ma caratterizzate dalle stesse proprietà meccaniche e sollecitate da segnali con lo stesso $f_m/f_{0,1D}$. Si noti come, nel caso di valle molto estesa (Figura 2a), l'effetto della geometria bidimensionale si risenta esclusivamente in corrispondenza dei bordi della valle, come evidenziato dal valore unitario del rapporto $AG_{2D/1D}$ lungo tutta la superficie del deposito tranne che nella zona prossima ai bordi dove attinge valori anche pari a 1.5. Invece, nel caso di valle

meno estesa (Figura 2b), lungo la superficie si possono identificare due zone dove $AG_{2D/1D}$ è massimo, una localizzata al centro valle ed un'altra ai bordi.

L'amplificazione bi-dimensionale, come già evidenziato, è dovuta principalmente alle onde di Rayleigh, che, generate dal contatto inclinato fra il terreno ed il *bedrock*, viaggiano in direzione orizzontale all'interno della valle. Qualunque sia il fattore di forma considerato, esse interferiscono in maniera 'costruttiva' con le onde dirette in corrispondenza dei bordi della valle. Al centro valle, invece, le stesse onde sono responsabili di un secondo picco di amplificazione solo nel caso di valle poco estesa ($H/B=0.25$), in cui la larghezza non è tale da permettere all'attenuazione geometrica di ridurre l'energia delle onde di Rayleigh fino a renderne trascurabile l'influenza al centro della valle.

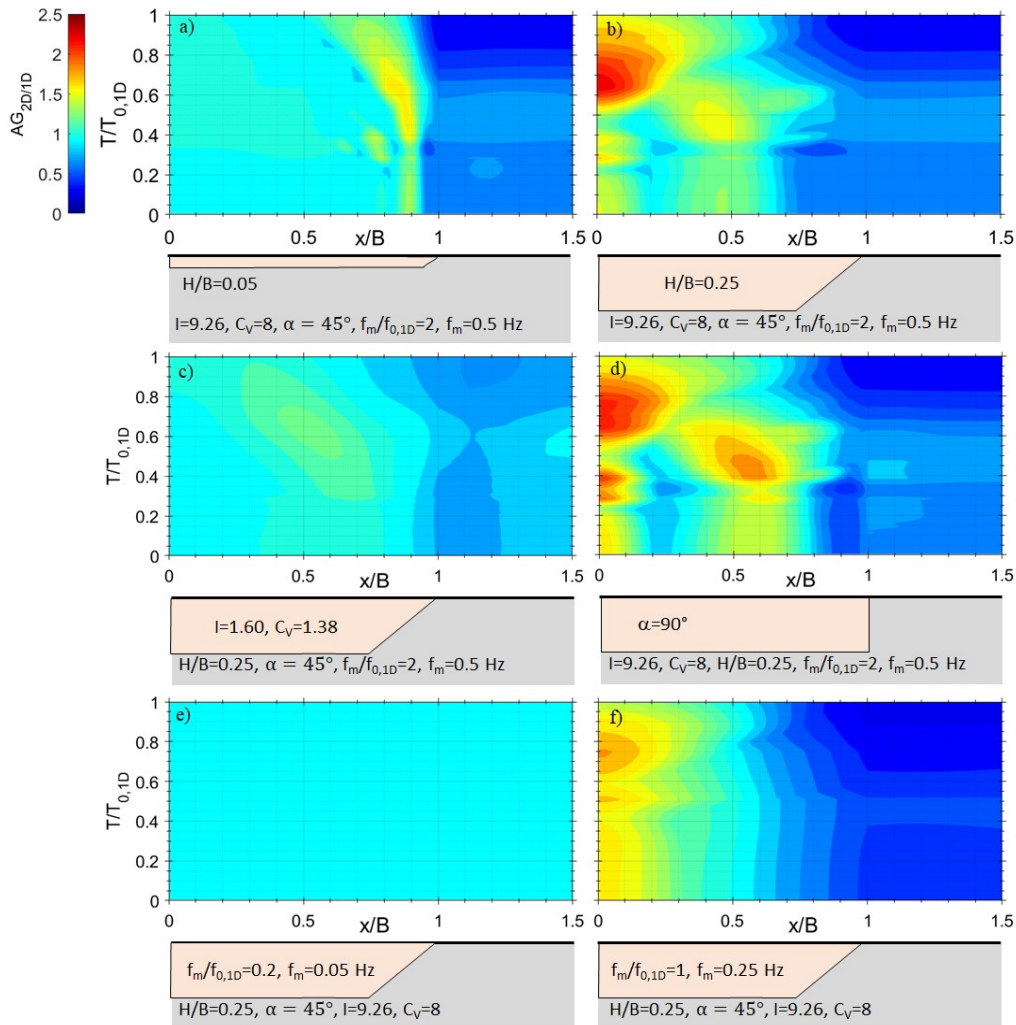


Fig. 2. Variazione di $AG_{2D/1D}$ lungo la valle per diversi valori di H/B , α , I e $f_m/f_{0,1D}$

In Figura 2c si riportano i risultati ottenuti per una valle simile a quella di Figura 2b, ma caratterizzata da un contrasto di impedenza significativamente minore ($I=1.6$ in Figura 2c mentre $I=9.6$ in Figura 2b). Si noti come, per bassi valori di I , non si evidenziano significativi effetti di amplificazione geometrica, risultando $AG_{2D/1D}=1$ lungo tutta la valle. Ciò è dovuto al fatto che l'energia delle onde di Rayleigh è proporzionale a I e quindi gli effetti 2D legati alle onde di superficie diminuiscono con tale parametro.

L'angolo di inclinazione dei bordi ha una scarsa influenza sull'amplificazione geometrica al centro valle, come mostra il confronto tra le Figure 2b,d in cui sono confrontati i risultati delle analisi eseguite su due valli aventi lo stesso H/B , le stesse proprietà meccaniche ma diverso α (45° e 90°). Per contro, lo stesso confronto evidenzia che il picco di amplificazione ai bordi e la sua posizione

dipendono significativamente da α .

Anche la frequenza mediana del moto di input influisce significativamente sull'amplificazione bi-dimensionale, come mostra il confronto tra i risultati riportati nelle Figure 2b,e,f ottenuti per valli con le stesse proprietà geometriche e meccaniche ma sollecitate con segnali caratterizzati da f_m rispettivamente pari a 0.05, 0.5 e 0.25 Hz. Più correttamente ciò che influisce sul moto in superficie è il rapporto tra la frequenza mediana dell'input e quella propria del banco, valutata in corrispondenza della verticale di centro valle. Infatti, nel caso di $f_m \ll f_{0,1D}$ (Figura 2e) l'amplificazione 2D è uguale a quella 1D ($AG_{2D/1D} = 1$), ciò è dovuto al fatto che $\lambda_m \gg H$ e quindi l'onda non interagisce con la valle. Invece per $f_m > f_{0,1D}$ (Figura 2b) l'amplificazione 2D è molto significativa sia ai bordi sia al centro valle, in quanto λ_m è minore di H o confrontabile con esso. Infine, se f_m è prossima a $f_{0,1D}$ (Figura 2f) il rapporto $AG_{2D/1D}$ è maggiore di 1 solo al centro valle ed è minore di quello ottenuto per $f_m/f_{0,1D} = 2$.

Il rapporto $AG_{2D/1D}$, così come definito, dipende quindi dal contenuto in frequenza del moto di riferimento e assume valori diversi in funzione del periodo T considerato. Al fine di ottenere un parametro che sinteticamente esprima l'entità dell'amplificazione bidimensionale, correlandola alle sole proprietà geometriche e meccaniche della valle, in corrispondenza di ciascuna ascissa e per ogni periodo si è effettuata la media dei valori del rapporto $AG_{2D/1D}$ ottenuto per i 12 segnali di input utilizzati, ottenendo così un fattore di amplificazione indipendente dalla frequenza dell'input.

$$\overline{AG_{2D/1D}}\left(T, \frac{x}{B}\right) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AG_{2D/1D}\left(T, \frac{x}{B}\right) \quad (3)$$

Il fattore medio così ottenuto, a parità di ascissa adimensionalizzata, x/B , varia con il periodo, T . Per ottenere quindi un fattore di amplificazione indipendente anche dal periodo, i valori di $AG_{2D/1D}$ medio espressi dalla (3) sono stati ulteriormente mediati nell'intervallo di valori di periodo ricompresi tra $0s$ e $T_{0,1D}$, definendo così un fattore sintetico dell'amplificazione dovuta agli effetti di valle (*Valley Amplification Factor*, *VAF*), ovvero:

$$VAF\left(\frac{x}{B}\right) = \frac{1}{T_{0,1D}} \int_0^{T_{0,1D}} \overline{AG_{2D/1D}}\left(T, \frac{x}{B}\right) \cdot dT \quad (4)$$

Il *VAF* è, quindi, un parametro indicativo dell'amplificazione media dello spettro di risposta fino al periodo di risonanza mono-dimensionale, indipendente dalla frequenza di sollecitazione. Esso dipende unicamente da H/B , α e I , ed è variabile da punto a punto lungo la valle. Nelle elaborazioni sono stati presi in considerazione solo valori del *VAF* maggiori o uguali a 1, trascurando quindi eventuali fenomeni di attenuazione che si potrebbero generare in prossimità dei bordi. In Figura 3a,b,c si riporta la variazione del *VAF* con H/B , α e I . Gli andamenti del *VAF* confermano ciò che è stato precedentemente discusso per $AG_{2D/1D}$.

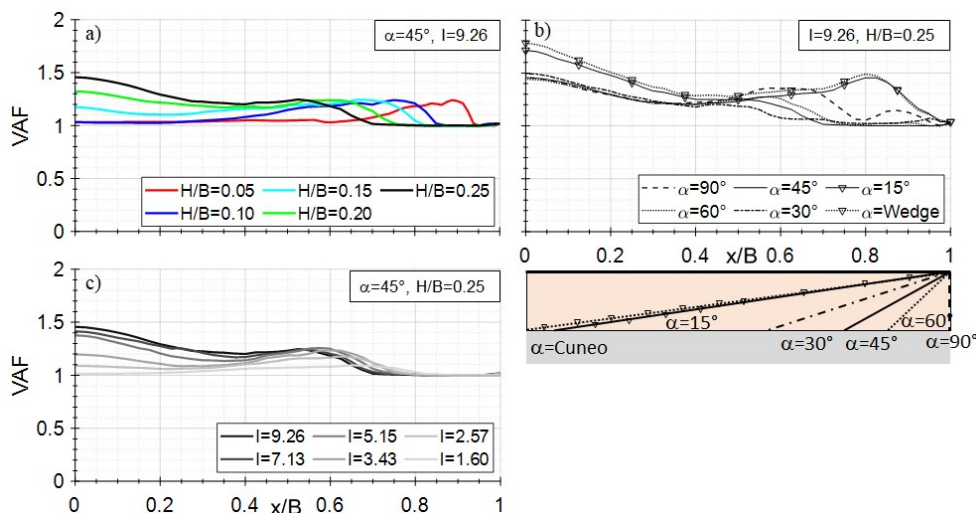


Fig. 3. Andamento del *VAF* lungo la valle ottenuta variando: a) H/B ; b) α ; c) I

4. Conclusioni

I risultati di un esteso studio parametrico sulla risposta sismica locale di valli alluvionali hanno permesso di valutare l'effetto del fattore di forma, del contrasto d'impedenza, dell'inclinazione dei bordi e della frequenza di sollecitazione sul moto sismico superficiale. Si è definito un fattore di amplificazione di valle in modo da disaccoppiare i fattori geometrici da quelli che influenzano l'amplificazione mono-dimensionale. La sintesi dei risultati evidenzia che:

1. al centro della valle il VAF aumenta al crescere del fattore di forma, H/B , e del rapporto di impedenza, I , mentre è indipendente dall'angolo di inclinazione dei bordi, α ;
2. l'entità dell'amplificazione geometrica ai bordi è indipendente dal fattore di forma e dal contrasto di impedenza ma aumenta con α ;
3. la posizione del punto di massima amplificazione è fortemente dipendente da H/B , I e α : in particolare, si sposta verso il centro al crescere del fattore di forma e del contrasto d'impedenza, mentre migra verso i bordi al crescere dell'acclività del contatto fra il *bedrock* e il deposito alluvionale.

I risultati evidenziano, inoltre, che la classe delle valli con un fattore di forma $H/B < 0.25$ può essere suddivisa in due sottoclassi sulla base del rapporto di forma. In particolare, per valori di $H/B < 0.1$ esse sono caratterizzate da una significativa amplificazione bidimensionale ai bordi mentre al centro della valle la risposta è pressoché monodimensionale. Invece, per valori di $H/B > 0.1$ la distribuzione del VAF lungo la valle presenta due picchi distinti, al centro valle e ai bordi.

I risultati ottenuti dal presente studio costituiscono il punto di partenza per la definizione di una metodologia semplificata utile al fine di tener conto degli effetti amplificativi di valle anche nelle normative tecniche.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Task 16.1 '*Site response analysis and liquefaction*' del progetto ReLUIS-DPC 2019-2021, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile.

Bibliografia

- Aki K., Larner K. L. (1970) "Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves", *Journal of Geophysical Research*, 75(5), 933–954.
- Alleanza G.A., Chiaradonna A. (2018). "Previsione degli effetti di non linearità dei terreni: confronto tra codici di calcolo per analisi 1D di risposta sismica locale". *Atti del VIII Incontro Annuale Giovani Ingegneri Geotecnici*. Udine.
- Alleanza G. A., Chiaradonna A., d'Onofrio A., Silvestri F. (2019). "Parametric study on 2D effect on the seismic response of alluvial valleys" *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions: Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, (ICEGE 2019): 1082–1089.
- Bard P.Y., Bouchon M. (1980a) "The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1263–1286.
- Bard P.Y., Bouchon M. (1980b) "The seismic response of sediment-filled valleys. Part 2. The case of incident P and SV waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(5), 1921–1941.
- Bard P.Y., Bouchon M. (1985) "The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(2), 519–541.
- Gelagoti F., Kourkoulis R., Anastasopoulos I., Tazoh T., Gazetas G. (2010). "Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: Sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical component", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3035–3054.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2016). *FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Ver. 8.0. Minneapolis: Itasca.
- Kottke A. R., Rathje E. M. (2008). "Technical manual for Strata. Report No.: 2008/10". Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- NTC 2018. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. D.M. 17/01/2018. Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni. S.O. n. 8 alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 42 del 20 febbraio 2018.
- Zhu C., Thambiratnam D. (2016). "Interaction of geometry and mechanical property of trapezoidal sedimentary basins with incident SH waves", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(11), 2977–3002.