

PROGETTAZIONE DI PARATIE FILTRANTI A SOSTEGNO DI PENDII INSTABILI

Andrea Galli

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
andrea.galli@polimi.it

Claudio di Prisco

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
claudio.diprisco@polimi.it

Sommario

Nella nota, facendo riferimento al caso delle paratie filtranti, sono analizzate tre classi di metodi progettuali semplificati (metodi allo Stato Limite Ultimo, Metodi Ibridi e Metodi negli Spostamenti), con l'intento di fornire uno strumento utile al progettista per dimensionare la struttura e per valutare l'efficacia dell'intervento.

1. Introduzione

Lo studio dell'interazione tra opere di sostegno e pendii instabili è stato oggetto, fin dal primo Dopoguerra, di sempre più approfonditi studi teorici, sperimentali e numerici, capaci di chiarire sempre meglio gli aspetti essenziali del problema, quali (i) geometria del pendio e proprietà dei materiali che lo costituiscono, (ii) scelta della tipologia e del posizionamento dell'opera, (iii) descrizione dei carichi agenti e della loro variabilità spazio-temporale. I metodi di progettazione attualmente in uso, tuttavia, faticano a tenere debitamente in conto tutti questi aspetti: da una parte, metodi di progettazione semplificati, basati su soluzioni in forma chiusa o su abachi progettuali, sono più adatti alla fase di semplice predimensionamento dell'intervento, e non forniscono alcuna indicazione prestazionale; dall'altra, i recenti approcci numerici richiedono spesso competenze teoriche e oneri computazionali ancora elevati per poter essere considerati un agile strumento progettuale.

Un recente progetto PRIN (2011), con riferimento al caso particolare delle paratie filtranti, ha consentito di mettere a punto un quadro organico per la progettazione di questa tipologia di opere di sostegno, basandosi su tre approcci, a complessità via via crescente: (a) Metodi allo Stato Limite Ultimo, (b) Metodi Ibridi, (c) Metodi negli Spostamenti.

I primi, assumendo un comportamento rigido-perfettamente plastico sia per il pendio, sia per la struttura, sia per l'interfaccia terreno struttura, consentono essenzialmente di stimare il valore dell'azione di sostegno A che l'opera è in grado di trasferire al terreno, da impiegarsi poi nei classici metodi di analisi di stabilità del pendio per definire un fattore di sicurezza globale F_s per il meccanismo di rottura in esame. Si ammette implicitamente che l'azione di sostegno A fornita dalla struttura non dipenda dalla distribuzione spaziale e dall'ampiezza del campo di spostamenti U del terreno (Figura 1a).

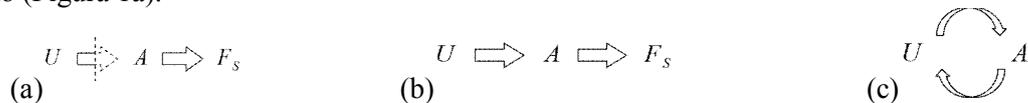


Fig 1. Definizione dei diversi approcci: (a) stato limite ultimo, (b) metodi ibridi, (c) metodi negli spostamenti

I secondi introducono espressamente un modello di interazione tra terreno e struttura per stimare la

cosiddetta “curva caratteristica” del sistema $A=A(U)$, che esprime il valore dell’azione di sostegno A in funzione dello spostamento U del pendio. I metodi ibridi, quindi, combinano un approccio SLU per valutare la stabilità del pendio, con un approccio in condizioni di esercizio per descrivere la struttura e la sua interazione con il terreno, facendo dipendere dunque il fattore di sicurezza anche dal campo di spostamenti del terreno (Figura 1b).

I metodi negli spostamenti si pongono invece l’obiettivo di descrivere compiutamente l’evoluzione del campo di spostamenti del terreno risolvendo l’equazione di moto della massa di terreno instabile in presenza dell’opera di sostegno, rappresentata ancora dalla curva caratteristica $A=A(U)$. Tali approcci colgono quindi non solo l’influenza che il campo di spostamenti del terreno ha sull’evoluzione della forza di sostegno A , ma anche, viceversa, l’effetto di quest’ultima sugli spostamenti della massa di terreno (Figura 1c) e consentono quindi al progettista di valutare l’efficacia dell’intervento direttamente in termini di riduzione delle velocità di spostamento. Questi ultimi si configurano quindi non solo come metodi di progettazione, ma possono anche costituire una solida base per l’interpretazione dei dati di monitoraggio di medio-lungo periodo post-operam, e per la scelta di possibili misure correttive. Un esempio di applicazione dei tre metodi alla progettazione di una paratia filtrante è discusso nella recente pubblicazione di Galli et al. (2017). Nel seguito, dopo un breve richiamo sulla definizione delle principali caratteristiche del sistema, saranno discussi più in dettaglio i tre approcci.

2. Interazione paratia-pendio

Una paratia filtrante è costituita da un insieme di pali (lunghezza L e diametro D) inseriti verticalmente all’interno del terreno instabile con interasse S . Qualora si rendesse necessario, il progettista può anche scegliere di inserire più ordini di paratie lungo il pendio, a distanza B (Figura 1a).

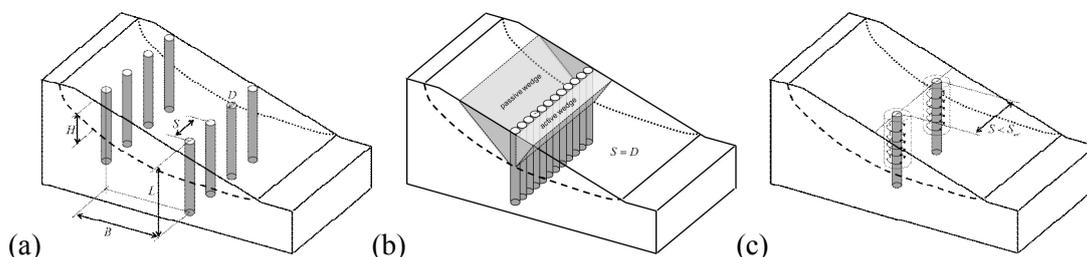


Fig 1. (a) definizione della geometria del sistema.

Meccanismi di rottura molto differenti possono essere mobilitati dall’interazione tra palo e terreno a seconda della spaziatura S tra i pali: dai semplici meccanismi di rottura in spinta attiva e passiva che si verificano per spaziature molto ridotte (Figura 1b, con comportamento assimilabile a quello di un setto continuo), fino a meccanismi di rifluimento del terreno attorno al palo, nel caso in cui la spaziatura sia sufficientemente elevata da poter considerare i pali come pali isolati (Figura 1c). In tutti i casi intermedi, le aree di influenza dei pali si sovrappongono, generando il cosiddetto “effetto arco” (Ito e Matsui, 1975). Al variare della spaziatura S cambia quindi in modo sostanziale il valore dell’azione di sostegno che la paratia può offrire al pendio. In modo simile, anche la distanza B tra gli ordini di paratie può significativamente influenzare la valutazione dell’azione di sostegno: per valori di B ridotti, infatti, i meccanismi di rottura dei differenti ordini di pali tendono a sovrapporsi, con conseguente riduzione dell’azione di sostegno risultante per ciascuna paratia (“effetto ombra”). I meccanismi qui ricordati si attivano però solo nel caso in cui i pali siano correttamente immorsati nello strato di terreno stabile. Al crescere della lunghezza L , infatti, i possibili meccanismi variano da una traslazione a una rotazione rigida dei pali (Figura 2a e b, rispettivamente nei casi di insufficiente o scarso immorsamento), fino ad arrivare al caso immorsamento completo (Figura 2c). Ciascuno di questi tre meccanismi si articola poi in sotto casi a seconda che si considerino pali infinitamente

resistenti a flessione, o pali con resistenza flessionale M_Y finita (questi casi non sono riportati qui per brevità, ma si veda a tal proposito i lavori di Viggiani, 1981, e Di Laora et al. 2017), e della condizione di vincolo imposta alla testa del palo: estremo libero, vincolo alla rotazione (in genere ottenuta collegando le teste dei pali con una struttura torsionalmente rigida), vincolo alla traslazione (in genere ottenuta inserendo un ancoraggio profondo, ad esempio un tirante),

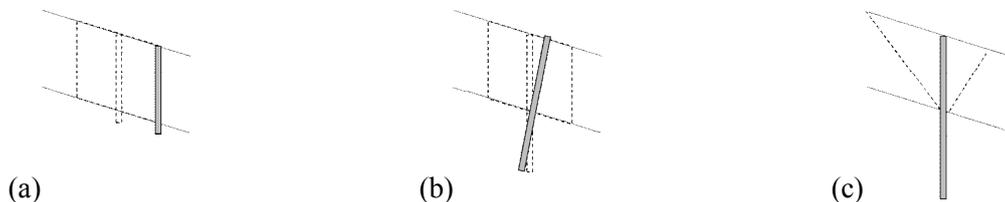


Fig 2. (a) insufficiente immorsamento del palo; (b) scarso immorsamento; (c) immorsamento completo.

È possibile allora rappresentare idealmente l'azione di sostegno A trasmessa in condizioni di collasso (espressa in genere come valore unitario, per metro lineare di sviluppo della paratia) in funzione della spaziatura tra i pali come mostrato in Figura 3, ove si evidenziano almeno tre differenti campi: (a) zona in cui il comportamento del sistema è assimilabile a quello di un setto continuo (tale zona, a rigore valida solo per la condizione $S/D=1$, viene in genere estesa almeno fino a valori di $S/D=2$); (b) zona di mobilitazione dell'effetto arco, in cui si ha un passaggio continuo tra il comportamento di un setto e quello di un palo isolato; (c) zona in cui il sistema si comporta come un serie di pali isolati, ove l'azione di sostegno unitaria risulta inversamente proporzionale alla spaziatura tra i pali (si rimanda a Muraro et al., 2014, per alcune valutazioni numeriche della curva qui descritta). La transizione tra le zone (b) e (c) avviene per un valore di spaziatura critica S_{cr} compreso tra 3 e 6 volte il diametro D del palo (Ellis et al., 2010, Muraro et al., 2014). Evidentemente, nella stima del valore ultimo dell'azione di sostegno A trasmessa al pendio, il progettista dovrà avere cura di scegliere per ciascuna delle tre zone il minimo tra i valori associati ai meccanismi di rottura richiamati in precedenza (Figura 2a-c), a seconda della lunghezza L del palo. La risultante, quindi, risulta essere crescente con il valore di L , fino al raggiungimento di una condizione di "ottimo", corrispondente alla lunghezza L_{opt} che garantisce il completo immorsamento del palo nel terreno di base, massimizzando così l'azione di sostegno. La curva $A=A(L,S/D)$ qui descritta risulta essere strumento indispensabile per la progettazione, che richiede essenzialmente di dimensionare l'intervento (valori di lunghezza L e spaziatura S dei pali, una volta scelto il valore del diametro D) e di scegliere la necessaria resistenza meccanica (M_Y) dei pali.

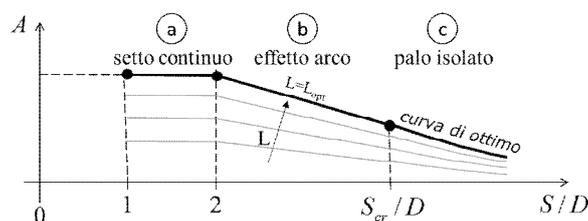


Fig 3. Dipendenza dell'azione di sostegno dalla spaziatura tra i pali.

3. Metodi allo Stato Limite Ultimo (SLU)

Secondo un approccio allo Stato Limite Ultimo, l'analisi di stabilità di un pendio può essere condotta mediante i classici metodi dell'equilibrio limite, simbolicamente riassunti dall'equazione

$$E_k^F = \frac{R_k^F}{F_S} + A_k^F, \quad [1]$$

ove E , R ad A rappresentano rispettivamente le azioni instabilizzanti (dovute al peso del terreno e ai

carichi esterni), la risultante della resistenza a taglio lungo la superficie di scorrimento e l'azione di sostegno fornita dalla paratia filtrante. Si noti che la [1] può esprimere un equilibrio alla traslazione o alla rotazione a seconda che ci si riferisca al caso di un pendio infinitamente esteso o ad una frana rotazionale in un pendio di altezza finita. Il pedice "k" ricorda che le azioni sono riferite ai valori caratteristici dei parametri, mentre l'apice "F" fa riferimento alla superficie di scivolamento in esame. In fase di progetto la [1] può essere impiegata per stimare il valore dell'azione A necessaria a garantire un preciso valore di F_S di progetto (Figura 4a). Si precisa che la [1], per semplicità, è espressa qui in termini di fattore di sicurezza globale, ma può essere anche agevolmente riscritta, nello spirito delle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni e senza cambiare la filosofia progettuale qui proposta, introducendo i valori di progetto delle grandezze E, A ed R, ottenuti adottando gli opportuni coefficienti di sicurezza parziali.

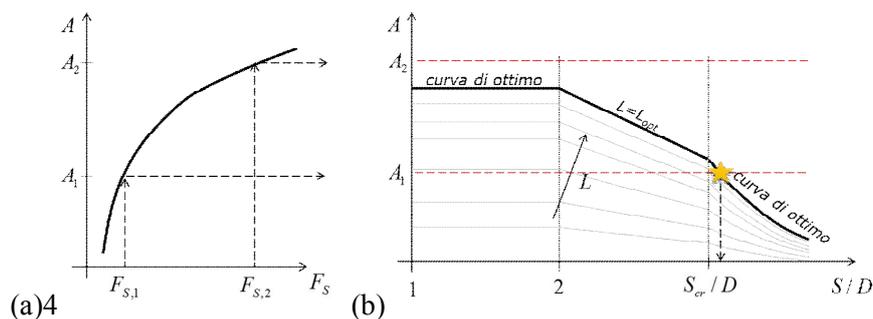


Fig 4. (a) relazione tra fattore di sicurezza a azione di sostegno richiesta; (b) scelta del valore di spaziatura.

Per il valore scelto del diametro D dei pali è immediato allora determinare il valore dell'azione di sostegno necessaria, in funzione del valore F_S di progetto di ($F_{S,1}$ in Figura 4a), ed entrare così nella curva $A=A(L,S/D)$ di Figura 4b per determinare il valore corretto di spaziatura. In genere si sceglie di massimizzare il valore dell'azione A, adottando per il palo la lunghezza L_{opt} . Qualora il valore di F_S richiesto fosse molto alto ($F_{S,2}$ di Figura 4a) e la corrispondente azione (A_2) fosse superiore alla curva di ottimo, si dovrebbe procedere con una nuova progettazione dell'intervento, ad esempio prevedendo di inserire altri ordini di paratie filtranti.

4. Metodi Ibridi

In un approccio con Metodi Ibridi l'interazione tra la struttura e il terreno, riassunta dalla curva caratteristica $A=A(U)$, può essere in linea di principio studiata mediante approcci numerici 3D alle differenze finite o agli elementi finiti, anche se in genere, per semplicità, nel caso di paratie filtranti si fa ricorso a modelli di interazione "a molle" basati sulla definizione delle curve P-y, che descrivono l'andamento della forza di interazione tra ogni concio di palo e il terreno circostante. Esistono in letteratura numerosi lavori a riguardo di natura teorica, sperimentale o numerica, cui si rimanda per ulteriori approfondimenti (Matlock e Reese, 1960; Reese e Welch, 1975; Georgiadis, 1983; Reese et al., 2006). Qui ci si limita a ricordare che la curva caratteristica non è solo funzione delle proprietà meccaniche del palo e del terreno, ma dipende anche significativamente dalle condizioni di vincolo imposte alla testa del palo, dalla forma del profilo di spostamenti del terreno (Galli e di Prisco, 2013), nonché dal valore di eventuali azioni di pretensionamento $A_{0,P}$ inizialmente imposte alla struttura (a titolo di esempio, in Figura 5a sono mostrate qualitativamente le curve caratteristiche per un'opera attiva, curva (i), quale una paratia pretirantata e una passiva, curva (ii), quale ad esempio una paratia con pali ad estremo libero). L'introduzione della curva caratteristica dà al progettista un ulteriore grado di libertà nella progettazione, in quanto consente di scegliere il dimensionamento non solo in funzione del livello di sicurezza richiesto, ma anche alle prestazioni attese, espresse in termini di spostamenti di progetto per il pendio. Da un punto di vista concettuale occorre ricordare che la curva di "ottimo" di Figura 4b veniva raggiunta solo asintoticamente, in condizioni SLU per sistemi duttili, per valori di

spostamento del terreno $U \rightarrow \infty$. In condizioni di esercizio essa sarà evidentemente da definirsi anche in funzione del valore di spostamento di progetto fissato per il pendio. Scelto allora un valore $F_{s,d}$ di progetto (Figura 5b) e un valore di spostamento di progetto U_d , è immediato stimare valore dell'azione di sostegno richiesta, e il nuovo valore di spaziatura (in generale inferiore a quella valutata con approcci SLU), necessario per soddisfare sia le condizioni di sicurezza sia di funzionalità.

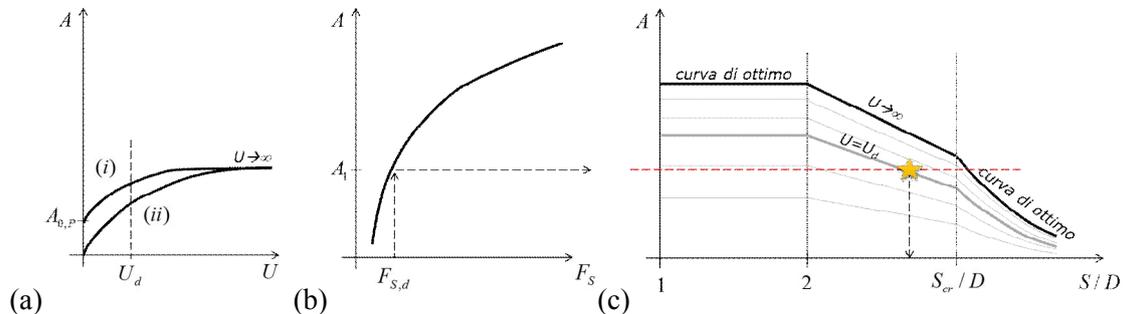


Fig 5. (a) esempi di curve caratteristiche; (b,c) scelta del valore di spaziatura associato allo spostamento $U=U_d$.

5. Metodi negli Spostamenti

L'impiego di metodi negli spostamenti consente di risolvere esplicitamente l'equazione del moto per la massa di terreno instabile, e di descrivere l'evoluzione nel tempo dello spostamento del terreno, o di un suo punto significativo. L'ambizione è quindi quella di valutare direttamente l'efficacia dell'intervento in termini di riduzione delle velocità di spostamento del terreno e contenimento degli spostamenti entro il valore di progetto U_d , nonché di stima del tempo necessario per raggiungere la nuova condizione di equilibrio stabile (Figura 6), dopo l'esecuzione dell'intervento.

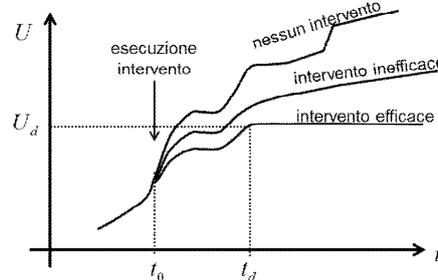


Fig 6. Esempi di evoluzione temporale degli spostamenti di un pendio instabile.

Tali approcci sono stati oggetto di recenti pubblicazioni a cura degli autori (Galli e di Prisco, 2013; Galli e Bassani, 2016) e di una precedente nota IARG (Galli e Castelli, 2015), a cui si rimanda per ulteriori informazioni. Si sottolinea solamente che, richiedendo la soluzione di un'equazione del moto (in genere per via numerica), tali metodi negli spostamenti non sempre consentono un dimensionamento esplicito della paratia filtrante (cioè la determinazione diretta dei valori di progetto di L , S , D), ma possono essere agevolmente impiegati per la verifica di soluzioni progettuali preliminari, ottenute con un metodo allo Stato Limite Ultimo o con un metodo Ibrido.

6. Conclusioni

In riferimento al caso di paratie filtranti, nella nota sono presentati tre approcci progettuali basati rispettivamente su Metodi allo Stato Limite Ultimo (SLU), Metodi Ibridi e Metodi negli Spostamenti. L'attenzione è volta a fornire al progettista i concetti base per ottimizzare le dimensioni della struttura in funzione degli obiettivi progettuali. I metodi SLU, di semplice utilizzo anche a partire da noti risultati da letteratura, consentono di dimensionare l'opera in funzione del grado di sicurezza atteso

(espresso in genere in termini di fattore di sicurezza globale del meccanismo di rottura nel pendio), ma non danno alcuna informazione riguardo le prestazioni dell'intervento; essi risultano dunque appropriati nel caso di un intervento volto a prevenire il collasso di meccanismo di rottura già completamente localizzato. Approcci basati su Metodi Ibridi, grazie all'introduzione di un modello di interazione tra terreno e struttura, superano le limitazioni dei metodi SLU e danno al progettista la possibilità di dimensionare l'intervento anche in funzione della prestazione attesa, espressa in termini di spostamenti del terreno. I Metodi negli Spostamenti, infine, basandosi sull'integrazione dell'equazione del moto per la massa di terreno instabile, consentono di valutare direttamente la riduzione delle velocità di spostamento del pendio. Tali approcci sono quindi strumenti utili per una valutazione oggettiva dell'efficacia dell'intervento, ma risultano anche fondamentali per interpretare correttamente i dati di monitoraggio post-operam e definire realistici scenari evolutivi, nonché, all'occorrenza, per scegliere eventuali interventi correttivi.

Bibliografia

- Adinolfi M., Di Laora R., Maiorano R.M.S, Aversa A. (2015). "A seismic performance-based design approach for slope stabilizing piles". COMPDYN 2015 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineer
- AGI 2005. Linee guida sugli aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Patron Editore. Bologna
- Di Laora R., Maiorano R.M.S, Aversa S. (2017). "Ultimate lateral load of slope-stabilizing piles". *Géotechnique Letters* (sottomesso).
- Ellis, E.A., Durrani, I.K., Reddish, D.J., (2010). "Numerical modelling of discrete pile rows for slope stability and generic guidance for design". *Geotechnique* 60 (3), 185–195.
- Galli A., Bassani A. (2016). "Innovative performance-based design of slope stabilizing piles for a railway embankment". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. (in stampa)
- Galli A., Castelli M. (2015). "Approccio viscoplastico per lo studio di paratie filtranti a sostegno di pendii in frana". IARG 2015, Cagliari, 24-26 giugno 2015.
- Galli A., di Prisco C. (2013). "Displacement-based design procedure for slope-stabilizing piles". *Canadian Geotechnical Journal*, 50, 41–53.
- Galli, A., Maiorano, R.M.S., di Prisco, C., Aversa, S. (2017). "Design of slope-stabilizing piles: from Ultimate Limit State approaches to displacement based methods". *Rivista Italiana di Geotecnica* (accettato).
- Georgiadis, M. (1983). "Development of p-y curves for layered soils. In Proceedings of Geotechnical". Practice in Offshore Engineering, ASCE Specialty Conf., ASCE, Reston, Va., 536–545.
- Ito, T., and Matsui, T. (1975). "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles". *Soils and Foundations*, 15(4), 43–59.
- Matlock, H., Reese, L. C. (1960). "Generalized solutions for laterally loaded piles". *J. Soil Mech. Fdn. Div.*, ASCE. 86, No. SM5, 63-91.
- Muraro S., Madaschi A., Gaio A. (2014). "On the reliability of 3D numerical analyses on passive piles used for slope stabilisation in frictional soils". *Géotechnique* 64, No. 6, 486–492.
- Newmark, N. M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15 (2) 139–160.
- PRIN 2011. La mitigazione del rischio da frana mediante interventi sostenibili. Coord.naz.: prof. L.Cascini.
- Reese, L.C., Isenhower, W.M., Wang, S.T. (2006). Analysis and design of shallow and deep foundations. John Wiley.
- Reese, L.C., Welch, R.C. (1975). "Lateral loading of deep foundations in stiff clay". *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 101(7); 633–649.
- Viggiani C. (1981). "Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides". Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineers; Stockholm, vol. 3, pp. 555–560.