1. Buongiorno, mi chiamo Andrea Vescovini e parlerò della mia tesi intitolata “…” su cui ho lavorato in un periodo di sei mesi presso l’università di Stoccarda.
2. Oggetto della mia tesi è stato lo studio di modelli accoppiati per fluissi liberi e flussi in mezzi porosi. Considerando l’immagine possiamo pensare di avere un dominio diviso in due: nella parte superiore un flusso libero, per esempio di aria, nella parte inferiore un pezzo poroso, per esempio un terreno, che può essere completamente saturato dallo stesso fluido che c’è nella parte superiore oppure, in caso di flussi multifase, può essere parzialmente saturato anche da altri fluidi, per esempio acqua o altri liquidi. Modelli di questo genere trovano applicazione per esempio nello studio di processi di disseccamento o salinizzazione del suolo, andando a studiare l’effetto che il flusso libero ha sull’evaporazione dell’acqua contenuta nel mezzo poroso. Oppure si possono applicare anche allo studio di celle a combustibile con membrana a scambio protonico, le PEM fuel cells, che sono utilizzate per esempio come generatore per i veicoli a idrogeno. Focalizzandoci sul caso di evaporazione da un terreno, in figura sono riportati vari fenomeni che possono essere rilevanti, ma che sono complessi da studiare in quanto possono agire a diverse scale spaziali o temporali. A seconda delle necessità possono quindi essere considerati modelli più o meno complessi includendo o meno questi fenomeni.
3. In questa tesi è stato considerato un fluido monofase, con un solo componente, isotermo e in regime di turbolenza. L’obbiettivo principale è stato quello di studiare l’effetto di interfacce ruvide tra i due sottodomini del problema accoppiato, in quanto è un fattore che non può essere trascurato nello studio di sistemi naturali, e può avere un’influenza importante e in letteratura non si trovano molti risultati a riguardo. Per fare ciò si è deciso di puntare sui metodi TVD per il modello numerico del flusso libero, in quanto garantiscono una soluzione più accurata rispetto a schemi di ordine inferiore che è importante specialmente in regimi turbolenti, in quanto i vortici che si vengono a creare vicino all’interfaccia possono influenzare in maniera importante gli scambi tra i due fluidi.
4. Inizialmente le equazioni governanti del sistema, dopodiché accennerò agli aspetti più importanti del modello numerico e in seguito illustrerò alcuni dei risultati ottenuti. Infine alcune conclusioni.
5. Per quanto riguarda il fluido libero sono state utilizzate le equazioni RANS, chiuse utilizzando il modello di turbolenza k-omega. E’ stato scelto questo modello poiché garantisce buoni risultati anche nelle regioni del dominio vicine a un bordo solido, mentre altri modelli, quali il k-epsilon, solitamente utilizzano vicino ai bordi delle correzioni sfruttando delle leggi di parete, ma nel nostro caso, con interfacce non piane, l’applicazione delle leggi di parete sarebbe stata problematica.
6. Per quanto riguarda il flusso nel mezzo poroso è stato utilizzato un approccio con equazioni mediate (su elementi di riferimento?), si ha quindi la seguente equazione di continuità per un fluido incomprimibile e la velocità può essere espressa utilizzando la legge di Darcy oppure, come è stato fatto nel nostro caso, la legge di Forchheimer, che è una generalizzazione di Darcy per numeri di Reynolds più alti e include un termine quadratico.
7. Abbiamo quindi i due modelli nei due sottodomini, bisogna infine imporre condizioni di accoppiamento all’interfaccia. In particolare imponiamo la continuità della componente normale della velocità, la continuità dello sforzo normale (flusso della quantità di moto) e utilizziamo la seguente condizione di beavers-joseph-saffaman per la componente tangente delle velocità. Questa condizione consente uno slittamento (scivolamento) della velocità all’interfaccia proporzionale alla permeabilità del mezzo poroso.
8. Passando al modello numerico, per la discretizzazione spaziale è stato utilizzato il metodo dei volumi finiti (comune in ambito fluidodinamico in quanto garantisce la conservazione della massa). Nel flusso libero è stato utilizzato un approccio staggered grid, griglia sfalsata, in cui i gradi di libertà relativi alle variabili scalari (pressione, k, omega) sono posti al centro delle celle, mentre quelli relativi alle componenti della velocità sono posti sulle facce delle celle, allineati nella direzione normale alle facce (in questo modo gli spurious modes.. ). Nel mezzo poroso invece abbiamo la sola pressione come variabile primaria e utilizziamo un approccio cell-centred.
9. Una scelta importante da fare nella discretizzazione delle equazioni di Navier-Stokes è quella dello schema per l’approssimazione del termine convettivo. In particolare, si individua una quantità trasportata, che in questo caso è la velocità stessa, per la quale è necessario usare un’approssimazione. Si può scegliere un metodo Upwind, con accuratezza di ordine 1, che introduce molta dissipazione numerica. Si possono utilizzare schemi di ordine più alto, quali LUD o QUICK, che però risultano produrre oscillazioni non fisiche in certe situazioni. Si è scelto quindi di puntare sui metodi TVD che sono del second’orderine e che, utilizzando una non-linearità, garantiscono l’assenza di queste oscillazioni non fisiche.
10. Per la discretizzazione temporale sono stati utilizzati metodi impliciti incondizionatamente stavbili, quali BDF2 o BE. Infine il risultate sistema non lineare di equazioni algebriche è stato risolto tutto insieme, con un approccio monolitico, utilizzando il metodo di Newton. Per la risoluzione dei sistemi lineari è stato utilizzato un solutore diretto fornito dalla libreria UMFPACK.
11. Passiamo ora ai risultati numerici. Sono stati effettuati vari test per validare il modello numerico del flusso libero coi metodi TVD. Sono stati fatti dei test di convergenza risolvendo le equazioni di Navier-Stokes per casi con soluzione nota ed è stato ottenuto un ordine di convergenza generalmente tra 1.5 e 2. In seguito è stato utilizzato il test del backward facing step e sono stati confrontati i risultati ottenuti con quelli del codice della NASA CFL3D, disponibili online, ed è stata ottenuta una buona predizione della distanza di riattacco del flusso al bordo inferiore del dominio.
12. Passando allo studio del modello accoppiato, come detto in precedenza vogliamo analizzare l’effetto di un’interfaccia rugosa sul campo di velocità. Come prima approssimazione di interfaccia rugosa è stato scelto il dominio in figure, con un canale con sul bordo inferiore due cavità e lo spazio tra esse occupato da un mezzo poroso. Sull’interfaccia gamma\_int sono state applicate le condizioni di accoppiamento, sul bordo gamma\_base condizioni di flusso nullo, su bordo superiore condizioni di simmetria. È stata variata la permeabilità del mezzo poroso in un range di 6 ordini di grandezza.
13. Il profilo è analogo sopra le due cavità, con due picchi di velocità dovuti alla maggiore distanza dal bordo, si a invece un picco di velocità negativo al termine della cavità, quanto l’effetto del bordo torna ad essere importante. Si nota una variazione del profilo quando la permeabilità del mezzo poroso è superiore a circa 10^-8, con un aumento del primo picco, una diminuzione del primo picco negativo e un aumento della velocità prima della seconda cavità. Quest’ultimo effetto è probabilmente dato dalla condizione bJS che consente più slip.
14. Questo è il campo di velocità verso la fine della prima cavità, le frecce non sono scalate per motivi di visualizzazione, in quanto nel mezzo poroso i valori in gioco sono di alcuni ordini di grandezza inferiori. Si ha che una parte del flusso entra nel mezzo poroso ed esce da sopra. Aumentando la permeabilità entra più fluido e la zona in cui al di sopra esce si estende, per cui è probabile che questo causi un’estensione di questa zona in cui c’è un cambio di direzione del fluido e quindi una diminuzione della componente lungo l’asse x.
15. Nei pressi della seconda cavità, invece c’è una porzione di fluido che rientra nel mezzo poroso dal ricircolo che si viene a creare nell’angolo della cavità. I valori in gioco qui però sono inferiori e globalmente non va ad influenzare il campo di velocità in altre zone della regione col flusso libero.
16. Infine è stata calcolata la massa che viene scambiata per unità di tempo, calcolando il flusso che si ha attraverso l’interfaccia dalla regione col flusso libero al mezzo poroso. E’ stato confermato l’aumento netto dopo K=10^-8. Ripetendo il test con un dominio con cavità più profonde sono stati ottenuti risultati analoghi, con un aumento della massa scambiata dovuto principalmente all’aumento dell’estensione dell’interfaccia.
17. In conclusione si è verificato che il modello coi metodi TVD che è stato implementato garantisce una migliore accuratezza rispetto al metodo upwind in tutti i test proposti e anche nel test del backward facing step con flusso turbolento è stato ottenuto un buon accordo con dati di riferimento. Per quanto riguarda il modello accoppiato sono state studiate alcune configurazioni con cavità o ostacoli porosi che hanno messo in evidenza un effetto importante della permeabilità sul campo di velocità quando si oltrepassa una certa soglia, di 10^-8 m^2 nel nostro caso. Sviluppi futuri della tesi possono riguardare lo studio di altri tipi di rugosità, per esempio sperimentando profili lisci dati da funzioni sinusoidali. Aumentando lo sforzo computazionale si possono inoltre studiare scenari più complessi, considerato fluidi non isotermi e multifase per studiare i tassi di evaporazione. Infine, dal punto di vista numerico, si potrebbe cercare di utilizzare griglie adattate contenenti hanging nodes, e studiare come poter applicare i metodi TVD in questa situazione.