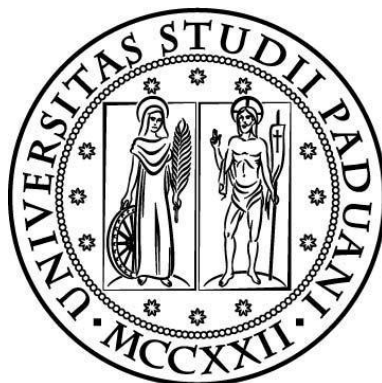


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE IDRAULICA

ANALISI DI SENSIBILITÀ DI UN MODELLO DI ONDE LUNGHE IN ACQUE BASSE CON RESISTENZE ANISOTROPE

Relatore: Ch.mo Prof. Andrea Defina

Correlatore: Ing. Daniele Pietro Viero

Laureando: Nicola Tenuti

Matricola: 1012148

Anno Accademico 2012-2013

SOMMARIO

SOMMARIO	1
1. INTRODUZIONE	3
2. IL MODELLO BIDIMENSIONALE AGLI ELEMENTI FINITI	6
2.1. LE EQUAZIONI DEL MOTO	6
2.2. TRANSIZIONE ASCIUTTO-BAGNATO	8
2.3. ANISOTROPIA NEGLI SFORZI AL FONDO	12
2.4. CARATTERISTICHE AGGIUNTIVE DEL MODELLO <i>2DEF</i>	19
2.4.1. <i>Elementi bidimensionali speciali</i>	19
2.4.2. <i>Elementi monodimensionali canale</i>	20
2.4.3. <i>Elementi monodimensionali speciali</i>	23
2.5. CONDIZIONI AL CONTORNO	24
3. APPLICAZIONE DEL MODELLO A CASI SCHEMATICI	26
3.1. COSTRUZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	28
3.2. PRIMA SIMULAZIONE: IMMISSIONE DI PORTATA DAL LATO SUPERIORE	37
3.2.1. <i>Scoline con elementi monodimensionali canale</i>	38
3.2.2. <i>Simulazione con resistenza isotropa del terreno</i>	41
3.2.3. <i>Simulazione con resistenza anisotropa del terreno</i>	45
3.2.3.1. Simulazione con <i>ks</i> pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	45
3.2.3.2. Simulazione con <i>ks</i> pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	48
3.2.3.3. Simulazione con <i>ks</i> pari a $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	52
3.2.3.4. Simulazione con <i>ks</i> pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	55
3.2.3.5. Simulazione con <i>ks</i> pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	58
3.2.4. <i>Confronto</i>	61
3.3. SECONDA SIMULAZIONE: EVENTO DI PRECIPITAZIONE EFFICACE	66
3.3.1. <i>Scoline con elementi monodimensionali canale</i>	66
3.3.2. <i>Simulazione con resistenza isotropa del terreno</i>	69
3.3.3. <i>Simulazione con resistenza anisotropa del terreno</i>	73
3.3.3.1. Simulazione con <i>ks</i> pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	73
3.3.3.2. Simulazione con <i>ks</i> pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	76
3.3.3.3. Simulazione con <i>ks</i> pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	80
3.3.4. <i>Confronto</i>	83

4.	APPLICAZIONE AD UN CASO REALE: SCARDOVARI (RO)	88
4.1.	CONSIDERAZIONI SULLA RISPOSTA CARATTERISTICA DEL BACINO	91
4.2.	CONSIDERAZIONI SULLA RIPARTIZIONE DELLE PORTATE NELLA RETE DI DRENAGGIO	93
4.3.	CONSIDERAZIONI SU FENOMENI DI ALLAGAMENTO DI MAGGIORE ENTITÀ.....	95
5.	CONCLUSIONI	96
	BIBLIOGRAFIA	98

1. Introduzione

Nel corso degli ultimi anni si è notevolmente diffuso l'uso di modelli matematici bidimensionali (2D), che permettono di descrivere in modo dettagliato le caratteristiche idrodinamiche di campi di moto spiccatamente 2D, come per esempio la propagazione di onde di piena in alvei dall'assetto sinuoso, e la simulazione di eventuali fenomeni di esondazione, consentendo di determinare, sul territorio inondato, le caratteristiche dell'onda di sommersione e il suo avanzamento.

La simulazione del comportamento idraulico di territori dalla morfologia complessa determina l'insorgere di alcune criticità, prima tra tutte la necessità di unire, in un'unica schematizzazione, elementi bidimensionali a elementi fortemente unidimensionali (1D, per es. alvei molto incisi o canali artificiali). Una soluzione efficace si ottiene mediante l'accoppiamento, in un unico schema di calcolo, di elementi bidimensionali e di elementi unidimensionali. Ne derivano una maggiore facilità nell'allestimento e nella gestione dei modelli, ridotti oneri computazionali e risultati spesso più accurati. Altro aspetto cardine per questo tipo di modelli è la necessità di simulare in modo verosimile la transizione tra asciutto e bagnato.

Il modello accoppiato uni-bidimensionale agli elementi finiti *2DEF* sviluppato negli anni da ricercatori dell'Università di Padova, si distingue per l'originale modalità con cui vengono trattati in modo accoppiato elementi 2D ed elementi 1D, e per l'elegante ed efficace trattazione della transizione asciutto/bagnato. A questo proposito, la soluzione proposta e implementata in *2DEF* si fonda sull'introduzione di un modello di sottogriglia per la rappresentazione delle quote del terreno. Questo significa che, all'interno di ogni singolo elemento di calcolo, si suppone che il terreno non sia perfettamente piatto, ma presenti quote variabili, come si riscontra effettivamente nella realtà. In questo modo, il modello è in grado di tenere conto, seppur in modo schematizzato e sintetico, di caratteristiche del campo di moto

che appartengono ad una scala spaziale inferiore rispetto alla dimensione degli elementi di calcolo.

Generalmente, i modelli numerici 2D pongono come ipotesi di base l'isotropia delle resistenze al fondo all'interno dei singoli elementi di calcolo, così che lo sforzo d'attrito al fondo assuma la stessa direzione del moto e verso opposto alla velocità dell'acqua. In ogni caso, l'entità delle resistenze, a parità di altre caratteristiche, non dipende dalla direzione del moto dell'acqua.

A ben vedere però, le forme di fondo che si presentano a una scala spaziale piccola, tale da non essere schematizzata esplicitamente ma da essere trattata mediante modelli di sottogriglia, sono spesso caratterizzate da forte anisotropia. Si pensi ad esempio ai numerosi fossi e canali di piccolissime dimensioni (scoline) che solcano i terreni di pianura, oppure ai solchi generati in fase di aratura che caratterizzano i terreni coltivati per tutto il periodo invernale: tutti questi casi presentano una marcata regolarità e un chiaro orientamento spaziale, che senza ombra di dubbio si ripercuote sul movimento dell'acqua.

Chiaramente, l'ipotesi di resistenze isotrope non rispecchia la situazione reale, in quanto l'acqua si propaga in modo differente nelle due direzioni principali data la differente resistenza offerta dal terreno.

Il presente lavoro di tesi riguarda le prime applicazioni di una versione modificata del modello uni-bidimensionale *2DEF*, nella quale è stata introdotta l'ipotesi di anisotropia delle resistenze al fondo. In particolare, si è voluta verificare la possibilità di riprodurre gli effetti sul campo di moto dovuti alla presenza di particolari conformazioni del terreno (per es. le scoline) che normalmente non si possono rappresentare esplicitamente nella modellazione idraulica, mediante la loro inclusione in un modello di sottogriglia.

Per far questo sono state condotte delle prove su casi di studio schematici, che consentono di confrontare agevolmente i risultati ottenuti seguendo diverse ipotesi di lavoro.

Inizialmente le scoline sono state rappresentate esplicitamente mediante l'inserimento di elementi canale monodimensionali; in un secondo caso, ipotizzando la resistenza isotropa del terreno, la presenza delle scoline non è stata considerata; nel terzo e ultimo caso il comportamento idraulico delle scoline è stato riprodotto considerando l'anisotropia delle resistenze al fondo, ossia mediante un modello di sottogriglia.

Infine, utilizzando parte delle indicazioni raccolte nello studio del caso schematico, il modello è stato applicato ad un caso reale, prendendo in considerazione una porzione di terreno agricolo nelle vicinanze dell'abitato di Scardovari (RO). Le scoline sono state inglobate

nel modello di sottogriglia e i risultati ottenuti, applicando diverse condizioni al contorno, sono stati confrontati con quelli ottenuti considerando la resistenza isotropa del terreno, trascurando quindi la presenza delle stesse scoline.

2. Il modello bidimensionale agli elementi finiti

I modelli più diffusi impiegati per lo studio della propagazione delle onde di piena sono quelli unidimensionali, data la loro notevole semplicità, nonostante in molte situazioni vengano meno le ipotesi su cui si basano. Questi modelli però presentano diversi problemi, sia per quanto riguarda lo schema di calcolo sia per quanto riguarda le caratteristiche dei parametri in gioco, nel simulare in modo realistico alcuni fenomeni, i quali richiedono una trattazione differente del campo di moto, che assume un carattere perlomeno bidimensionale.

Per sopperire a tali problemi, ha trovato sempre maggiore diffusione l'utilizzo di modelli bidimensionali a fondo fisso, in grado di descrivere con maggior grado di dettaglio la propagazione di un'onda di piena in un alveo, caratterizzato da tratti con dimensioni trasversali molto ampie, nei quali non è prevedibile a priori la direzione del flusso. Tali modelli sono inoltre in grado di simulare eventuali fenomeni di esondazione e di seguire, sul territorio inondato, l'avanzamento dell'onda di sommersione, purché le equazioni del moto siano opportunamente adattate e la modellazione delle aree destinate ad essere sommerse sia condotta tenendo conto degli effetti non trascurabili che le diverse strutture presenti sul territorio esercitano sulla propagazione dei fronti di allagamento.

2.1. Le equazioni del moto

Il modello matematico, ampiamente descritto in numerosi contributi scientifici (*Defina et al.*, 1994; *D'Alpaos et al.*, 1995; *Defina*, 2000; *Defina*, 2003; *D'Alpaos & Defina*, 2007) e che ha trovato in questi anni altrettanto numerose applicazioni, si basa sulla soluzione delle equazioni

di De Saint Venant che, come noto, descrivono il moto bidimensionale di una corrente a superficie libera, nelle ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni, di velocità uniformemente distribuita lungo la verticale e di fondo inderodabile.

Nella letteratura scientifica sono stati presentati diversi schemi numerici di soluzione delle equazioni di De Saint Venant.

Nel modello di riferimento, tali equazioni sono risolte adottando uno schema numerico agli elementi finiti su di una griglia triangolare, che viene utilizzata per schematizzare l'area oggetto dello studio.

Come già accennato, il modello risolve le equazioni del moto mediate sulla verticale nelle direzioni orizzontali x e y e l'equazione di continuità, esprimibili rispettivamente come:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{gY} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{1}{gY} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{1}{gY} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) - \frac{1}{gY} (Re_{xx} + Re_{xy}) + \frac{\tau_{bx}}{\gamma Y} - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{gY} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{1}{gY} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{1}{gY} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{Y} \right) - \frac{1}{gY} (Re_{xy} + Re_{yy}) + \frac{\tau_{by}}{\gamma Y} - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} = 0 \quad (2)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

nelle quali h indica la quota della superficie libera, x e y sono le ascisse spaziali orizzontali correnti, g è l'accelerazione di gravità, ρ è la densità del fluido, t è il tempo, \vec{q} è la velocità integrata sulla verticale con componenti q_x e q_y secondo le due direzioni orizzontali, R_{ij} sono gli sforzi turbolenti (o di Reynolds) nel piano orizzontale in cui i e j indicano le direzioni x o y , $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ è lo sforzo tangenziale al fondo espresso dall'equazione (4) e $\tau_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$ è lo sforzo prodotto dall'azione del vento sulla superficie libera espresso dall'equazione (5):

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left(\frac{|q|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) q \quad (4)$$

$$\tau_w = \rho_a c_d U_{wind}^2 \quad (5)$$

Nelle equazioni (4) e (5) sono indicati con k_s il coefficiente di scabrezza secondo Strickler, con U_{wind} la velocità del vento, e con c_d il coefficiente di resistenza, espresso nel modello mediante la relazione semiempirica:

$$c_d = c_{d0}(1 - e^{-\epsilon_w U_{wind}}) \quad (6)$$

in cui c_{d0} e ϵ_w sono costanti scelte opportunamente.

I termini Y e H che compaiono nelle equazioni indicano, rispettivamente, nel tempo generico e per ciascun elemento di calcolo, il volume d'acqua per unità di superficie e una profondità d'acqua equivalente, introdotta per descrivere l'effetto dei termini dissipativi quando il tirante si riduce e diventa confrontabile, per dimensione, con le irregolarità del terreno.

2.2. Transizione asciutto-bagnato

Pensando alla propagazione di una sottile lama d'acqua su di un terreno naturale, l'esperienza mette in evidenza l'importanza delle irregolarità della superficie, che comportano l'esistenza di un transitorio nel quale, all'interno dell'area in esame, coesistono porzioni di suolo asciutte e altre già sommerse.

Il contributo più innovativo fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova nella risoluzione delle equazioni che caratterizzano il fenomeno consiste nell'introduzione di un modello di sottogriglia, per cui, all'interno del singolo elemento di calcolo, l'andamento delle quote del terreno non viene considerato costante ma variabile, per cui si modificano le equazioni di continuità e del moto. Le asperità del fondo considerate nel modello sono caratterizzate da una grandezza caratteristica a_r , avente dimensioni di una lunghezza, che è direttamente legata all'altezza e alla distribuzione delle irregolarità presenti sulla superficie dei singoli elementi di calcolo con cui è schematizzato il campo di moto.

Al riguardo si osserva che abitualmente la superficie del dominio di calcolo è topograficamente caratterizzata attraverso la quota media degli elementi di calcolo che lo compongono, trascurando, quindi, il ruolo delle irregolarità del terreno come conseguenza di questa operazione di media. Tale semplificazione è accettabile per tiranti d'acqua elevati rispetto alle irregolarità della superficie, ma è certamente non veritiera per tiranti d'acqua modesti, a causa essenzialmente di una non corretta valutazione delle resistenze al moto e del volume d'acqua contenuto nell'elemento al generico istante di calcolo t .

Se si mantenesse la rappresentazione di superficie piana per ogni singolo elemento del reticolo di calcolo si avrebbe una istantanea transizione asciutto-bagnato, che comporta una serie di problemi numerici, ben noti in letteratura, che affliggono i classici schemi bidimensionali a griglia fissa.

Per rimuovere questi limiti, nello schema proposto si è ipotizzato che esista un intervallo di profondità all'interno del quale, durante l'evolversi della piena, si verificano condizioni variabili, comprese tra le due situazioni limite di elementi completamente asciutti e/o completamente bagnati.

L'idea che sta alla base dell'approccio proposto consente di tradurre concettualmente il transitorio asciutto-bagnato, facendo in modo che la capacità di invaso del singolo elemento (vale a dire la possibile estensione della superficie libera al variare della quota sul singolo elemento in rapporto alla superficie totale dell'elemento stesso) vari con continuità da un valore pressoché nullo, quando la quota idrometrica dell'elemento è inferiore alla quota minima delle irregolarità del terreno, al valore che compete all'intera estensione dell'elemento, quando la quota idrometrica è maggiore o uguale alla quota massima del terreno. Come indice dell'ampiezza delle irregolarità si introduce un parametro denominato a_r , detto anche Y_{lim} , pari alla differenza tra la quota della più alta asperità e la quota media \bar{h}_f , assunta come quota dell'elemento stesso.

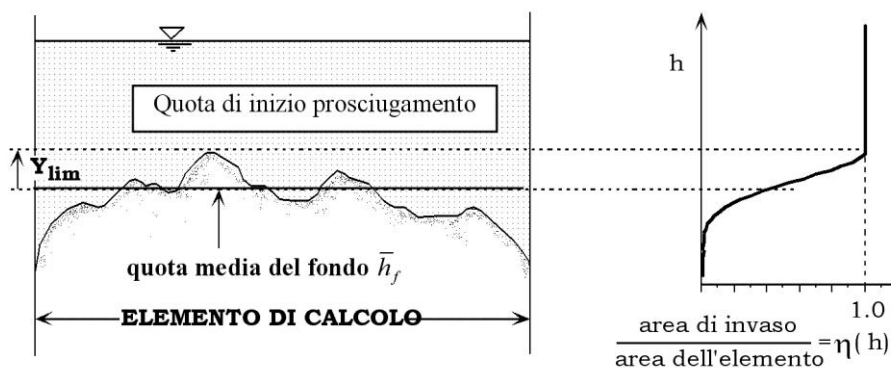


Figura 2.1 - Rappresentazione schematica dell'andamento delle quote del terreno all'interno del singolo elemento di calcolo (modello di sottogriglia) e dell'andamento della frazione di area bagnata rispetto all'area totale (η) in funzione dell'altezza h della superficie libera

Dal punto di vista matematico, per applicare un'operazione di media alle equazioni del moto si può utilizzare la funzione di fase:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & z > h_f \\ 0 & z \leq h_f \end{cases} \quad (7)$$

dove h_f è l'elevazione locale del fondo e $\mathbf{x} = (x, y, z)$ è il vettore delle coordinate spaziali.

Denotando con $\langle \rangle$ il processo di media di fase, ad una generica variabile del campo di moto $f(\mathbf{x}, t)$ corrisponde una $F(\mathbf{x}, t) = \langle \varphi(\mathbf{x})f(\mathbf{x}, t) \rangle$ mediata in fase con il seguente significato:

$$F(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{A} \int_A \varphi(\mathbf{x})f(\mathbf{x}, t)dA \quad (8)$$

essendo A l'area dell'elemento di calcolo.

A questo punto si definiscono le funzioni $\vartheta(\mathbf{x})$ e η , che rappresentano, rispettivamente, la frazione di area A che giace sopra la superficie del terreno e la frazione bagnata di A :

$$\vartheta(\mathbf{x}) = \langle \varphi(\mathbf{x}) \rangle \quad (9)$$

$$\eta = \vartheta(x, y, h) \quad (10)$$

indicando con h la quota della superficie libera.

Data la difficoltà che si incontra nella pratica nell'attribuire un valore al parametro a_r si è cercata, per esso, un'interpretazione diversa: la funzione $\vartheta(\mathbf{x})$ può essere considerata come la probabilità P che l'elevazione locale del fondo h_f all'interno di A non ecceda la generica elevazione z :

$$\vartheta(\mathbf{x}) = P(h_f \leq z) \quad (11)$$

Una interpretazione statistica può essere fornita anche per le quote di fondo h_f , assumendo che queste siano distribuite all'interno dell'area A secondo una funzione di densità di probabilità gaussiana, definita da $\partial\vartheta(\mathbf{x})/\partial z$, caratterizzata da un valore medio e da una deviazione standard σ_b , che è una possibile misura delle irregolarità del terreno:

$$a_r = 2\sigma_b \quad (12)$$

In questo modo si assume che le quote di fondo all'interno dell'area A assumano valori compresi tra $-\infty$ e $+\infty$, e che quindi esista per qualsiasi valore di z almeno un punto all'interno dell'area elementare rappresentativa che possa considerarsi bagnato.

E' interessante notare che il significato della lunghezza caratteristica a_r può essere fortemente concettualizzato al punto da descrivere anche gli effetti di irregolarità molto profonde del terreno, tali da formare una vera e propria rete di canali minori, che contribuiscono in modo rilevante al convogliamento delle acque e ad incrementare la celerità di avanzamento di eventuali fronti di sommersione.

Studi specifici svolti al riguardo hanno dimostrato come, in alcuni casi, raddoppiare il valore di a_r porti anche a quintuplicare la celerità media di avanzamento del fronte, e come, al contrario, tale celerità risulti fortemente ridotta nel caso di elementi caratterizzati da modeste asperità ($a_r=0.01$ m), sui quali con rapidità si passa dalla condizione di superficie asciutta a quella di superficie bagnata.

Sulla base di queste sintetiche considerazioni è immediato comprendere come l'ipotesi di terreno sostanzialmente piatto, adottata dalla quasi totalità dei modelli bidimensionali proposti in letteratura, dia risultati inattendibili riguardo alla velocità di avanzamento dei fronti di allagamento, non appena le irregolarità del terreno assumano un ruolo di una certa importanza sul fenomeno. Di conseguenza, risultano non realistiche le stime fornite da questi schemi relativamente ai tempi caratteristici di avanzamento dell'onda di sommersione in un terreno inizialmente asciutto, soprattutto nelle prime fasi dell'allagamento.

Il tirante idrico Y , definito come volume d'acqua al di sopra del terreno per unità di superficie, che in queste ipotesi non può mai essere nullo ma può solamente tendere a 0 per $z \rightarrow -\infty$, viene quindi calcolato come l'integrale della media della funzione di fase sulla verticale. Alla luce di quanto esposto, i termini η , Y e H che compaiono nelle equazioni risolutive del modello sono esprimibili come (Defina, 2000):

$$\eta = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{2D}{a_r} \right) \right] \quad (13)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta dz = a_r \left(\eta \frac{D}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4\left(\frac{D}{a_r}\right)^2} \right) \quad (14)$$

$$H \cong Y + 0.27\sqrt{Ya_r}e^{-\frac{2Y}{a_r}} \quad (15)$$

nelle quali $erf()$ è la funzione errore e $D = z - h_f$ è una profondità media data dalla differenza tra la quota della superficie libera e quella del fondo.

Il comportamento delle funzioni η e Y è rappresentato in Figura 2.2, in cui si nota che $Y > a_r$ quando $(z - h_f) > a_r$:

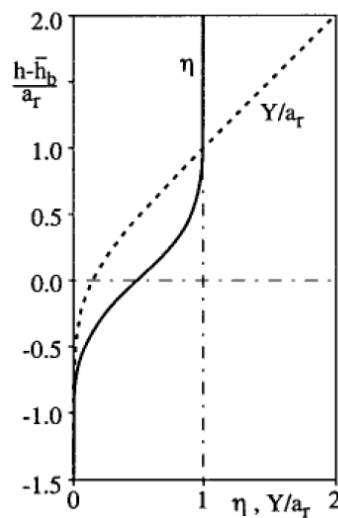


Figura 2.2 - Andamento delle funzioni η e Y/a_r .

2.3. Anisotropia negli sforzi al fondo

Nel presente elaborato è stata utilizzata e testata una nuova versione del modello, come detto in precedenza, in cui è stata introdotta l'ipotesi di anisotropia delle resistenze al fondo, ovvero il fatto che l'acqua incontra resistenze diverse allo scorrere in direzioni diverse, dirigendosi prevalentemente in una direzione rispetto all'altra in base ai valori assunti dal coefficiente di scabrezza del terreno k_s , che vengono a dipendere dalla direzione. Si riporta quindi di seguito la soluzione delle equazioni di De Saint Venant - tralasciando l'equazione di continuità, che non è direttamente interessata dalle forze d'attrito e viene risolta a parte - con l'ipotesi di anisotropia, arrivando a definire le equazioni che vengono utilizzate dal modello modificato.

Per esprimere le resistenze al fondo nel caso di anisotropia, occorre individuare un sistema di riferimento ortonormale, lungo i cui assi L - T le resistenze siano rispettivamente minime e massime (a parità di caratteristiche idrodinamiche della corrente). Per quanto riguarda i coefficienti di resistenza secondo Gauckler e Strickler, la condizione equivalente è $k_{SL} > k_{ST}$. Il sistema di riferimento L - T risulterà generalmente ruotato di un angolo α rispetto al sistema di riferimento x - y adottato per la risoluzione delle equazioni del moto nel modello numerico (Figura 2.3).

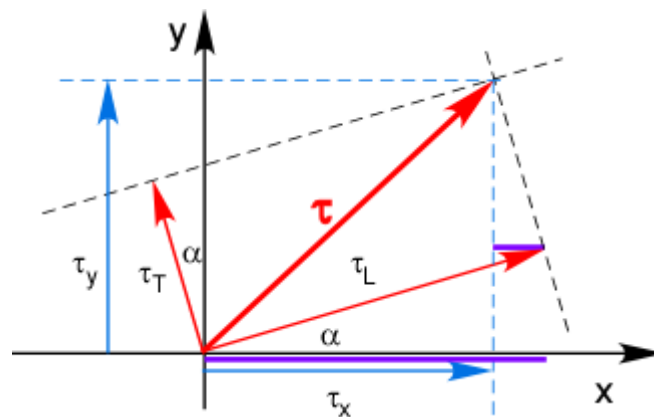


Figura 2.3 - Gli sforzi tangenziali, calcolati lungo le direzioni principali L - T , vengono proiettati sul sistema di riferimento x - y utilizzato per la soluzione delle equazioni di De Saint Venant. L'angolo di rotazione tra i due diversi sistemi di riferimento è indicato con α .

Le componenti τ_x e τ_y dello sforzo tangenziale, che compaiono nelle equazioni di De Saint Venant, vengono quindi espresse dalle seguenti relazioni:

$$\tau_x = \tau_L \cos \alpha - \tau_T \sin \alpha \quad (16)$$

$$\tau_y = \tau_L \sin \alpha + \tau_T \cos \alpha$$

con τ_L e τ_T sforzi tangenziali longitudinale e trasversale, espressi secondo la formulazione di Gauckler e Strickler come:

$$\frac{\tau_L}{\gamma Y} = \frac{|q|q_L}{k_{SL}^2 Y^{10/3}} \quad \frac{\tau_T}{\gamma Y} = \frac{|q|q_T}{k_{ST}^2 Y^{10/3}} \quad (17)$$

dove q_L e q_T sono le portate specifiche lungo le direzioni L e T , espresse da:

$$\begin{aligned} q_L &= q_x \cos \alpha + q_y \sin \alpha \\ q_T &= q_y \cos \alpha - q_x \sin \alpha \end{aligned} \quad (18)$$

Sostituendo le eq. (17) e (18) nelle eq. (16) si ottiene:

$$\frac{\tau_x}{\gamma Y} = \frac{|q|}{Y^{10/3}} \left[q_x \left(\frac{\cos^2 \alpha}{k_{SL}^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{k_{ST}^2} \right) + q_y \left(\frac{1}{k_{SL}^2} - \frac{1}{k_{ST}^2} \right) \sin \alpha \cos \alpha \right] \quad (19)$$

$$\frac{\tau_y}{\gamma Y} = \frac{|q|}{Y^{10/3}} \left[q_y \left(\frac{\sin^2 \alpha}{k_{SL}^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{k_{ST}^2} \right) + q_x \left(\frac{1}{k_{SL}^2} - \frac{1}{k_{ST}^2} \right) \sin \alpha \cos \alpha \right] \quad (20)$$

Effettuando le seguenti sostituzioni:

$$\frac{1}{k_{Sxx}^2} = \frac{\cos^2 \alpha}{k_{SL}^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{k_{ST}^2}$$

$$\frac{1}{k_{Sxy}^2} = \left(\frac{1}{k_{SL}^2} - \frac{1}{k_{ST}^2} \right) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\frac{1}{k_{Syy}^2} = \frac{\sin^2 \alpha}{k_{SL}^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{k_{ST}^2}$$

si ottiene la relazione definitiva degli sforzi tangenziali lungo x e y :

$$\frac{\tau_x}{\gamma Y} = \frac{|q|}{Y^{10/3}} \left[\frac{q_x}{k_{Sxx}^2} + \frac{q_y}{k_{Sxy}^2} \right] \quad (21)$$

$$\frac{\tau_y}{\gamma Y} = \frac{|q|}{Y^{10/3}} \left[\frac{q_x}{k_{Sxy}^2} + \frac{q_y}{k_{Syy}^2} \right] \quad (22)$$

Se fosse stata mantenuta l'ipotesi di isotropia del mezzo, ovvero $k_{SL} = k_{ST} = k_S$, si sarebbe ottenuto $k_{Sxx} = k_{Syy} = k_S$ e $k_{Sxy} = 0$. Di conseguenza, gli sforzi lungo x e y si sarebbero ricondotti all'usuale forma:

$$\frac{\tau_x}{\gamma Y} = \frac{|q|q_x}{k_S^2 Y^{10/3}} \quad \frac{\tau_y}{\gamma Y} = \frac{|q|q_y}{k_S^2 Y^{10/3}} \quad (23)$$

Esaminando le eq.(21) e (22), si noti come, considerando l'anisotropia delle resistenze al fondo, la definizione dei relativi sforzi assuma una forma maggiormente complessa, che presenta alcune interessanti specificità. Come è ovvio aspettarsi, a causa della rotazione del sistema di riferimento delle resistenze al fondo rispetto a quello del modello, la resistenza in una data direzione (per es. x) dipende dai coefficienti di resistenza lungo entrambi gli assi principali. Inoltre, mentre nella formulazione classica la componente dello sforzo lungo una direzione (per es. τ_x) non dipende dalla portata nella direzione normale (q_y), ora viene a dipendere anche da quest'ultima. La dipendenza della componente dello sforzo dalla portata nella direzione opposta è tanto maggiore quanto è grande la differenza delle resistenze tra i due assi principali. Infatti, il termine misto k_{Sxy}^2 dipende proprio dalla differenza di resistenza lungo le due direzioni principali $L-T$. Al contrario, poiché il prodotto tra $\sin \alpha \cos \alpha$ che compare nella definizione di k_{Sxy}^2 si annulla per angoli che sono multipli di 90° , questa dipendenza dello sforzo dalla portata in direzione ortogonale si annulla quando le direzioni principali delle resistenze si allineano con gli assi $x-y$.

Ritornando alle equazioni di DSV, utilizzando un approccio misto euleriano-lagrangiano, si possono eliminare le derivate parziali della portata specifica introducendo la derivata totale rispetto al tempo, in modo da includervi sia la parte di accelerazione temporale che quella di accelerazione convettiva, trasformandole come segue:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{d}{dt} \left(\frac{q_x}{Y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\gamma Y} - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} - \frac{1}{gY} (Re_{xx} + Re_{xy}) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{g} \frac{d}{dt} \left(\frac{q_y}{Y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\gamma Y} - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} - \frac{1}{gY} (Re_{xy} + Re_{yy}) = 0 \quad (25)$$

Introducendo le formulazioni precedentemente trovate degli sforzi tangenziali, risulta:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{gY\Delta t} (q_x - q'_{x0}) + \frac{|q'|}{Y^{10/3}} \left[\frac{q_x}{k_{Sxx}^2} + \frac{q_y}{k_{Sxy}^2} \right] - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} - \frac{1}{gY} (Re_{xx} + Re_{xy}) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{gY\Delta t}(q_y - q'_{y0}) + \frac{|q'|}{Y^{10/3}} \left[\frac{q_x}{k_{Sxy}^2} + \frac{q_y}{k_{Syy}^2} \right] - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} - \frac{1}{gY}(Re_{xy} + Re_{yy}) = 0 \quad (27)$$

dove Δt è il passo di integrazione temporale utilizzato nella soluzione numerica delle equazioni, mentre i termini indicati con l'apice " ' " sono riferiti all'istante di calcolo precedente.

Si introducono le seguenti sostituzioni in modo da semplificare l'equazione:

$$a_c = \frac{1}{gY\Delta t} \quad a_{xx} = \frac{|q'|}{k_{Sxx}^2 Y^{10/3}}$$

$$a_{xy} = \frac{|q'|}{k_{Sxy}^2 Y^{10/3}} \quad a_{yy} = \frac{|q'|}{k_{Syy}^2 Y^{10/3}}$$

Si vuole ottenere ora un'equazione che definisca q_x a prescindere da q_y , per cui si elimina questa variabile esplicitandola in entrambe le equazioni, ottenendo:

$$q_x \frac{a_c + a_{xx}}{a_{xy}} + q_y = -\frac{\partial h}{\partial x} \frac{1}{a_{xy}} + \frac{F_x}{a_{xy}} \quad (28)$$

$$\frac{a_{xy}}{a_c + a_{yy}} q_x + q_y = -\frac{\partial h}{\partial y} (a_c + a_{yy})^{-1} + \frac{F_y}{a_c + a_{yy}} \quad (29)$$

dove:

$$F_x = \frac{q'_{x0}}{gY\Delta t} + \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} + \frac{1}{gY}(Re_{xx} + Re_{xy})$$

$$F_y = \frac{q'_{y0}}{gY\Delta t} + \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} + \frac{1}{gY}(Re_{xy} + Re_{yy})$$

Sottraendo l'equazione (29) dalla (28), si trova:

$$q_x \left[\frac{a_c + a_{xx}}{a_{xy}} - \frac{a_{xy}}{a_c + a_{yy}} \right] = -\frac{\partial h}{\partial x} \frac{1}{a_{xy}} + \frac{\partial h}{\partial y} (a_c + a_{yy})^{-1} + \frac{F_x}{a_{xy}} - \frac{F_y}{a_c + a_{yy}} \quad (30)$$

Moltiplicando tutti i fattori per a_{xy} , si arriva alla seguente equazione che permette di ricavare q_x :

$$q_x \left[(a_c + a_{xx}) - a_{xy} \left(a_c \frac{1}{a_{xy}} + \frac{k_{Sxy}^2}{k_{Syy}^2} \right)^{-1} \right] = -\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{a_{xy}}{a_c + a_{yy}} \frac{\partial h}{\partial y} + F_x - \frac{a_{xy} F_y}{a_c + a_{yy}} \quad (31)$$

Si vuole ora definire un'equazione che permetta di ricavare q_y indipendentemente da q_x , per cui si esplicita tale variabile in entrambe le equazioni, ottenendo:

$$q_x + \frac{a_{xy}}{a_c + a_{xx}} q_y = -\frac{\partial h}{\partial x} (a_c + a_{xx})^{-1} + \frac{F_x}{a_c + a_{xx}} \quad (32)$$

$$q_x + q_y \frac{1}{a_{xy}} (a_c + a_{yy}) = -\frac{\partial h}{\partial y} \frac{1}{a_{xy}} + \frac{F_y}{a_{xy}} \quad (33)$$

Sottraendo l'equazione (32) dalla (33) si trova:

$$q_y \left[\frac{a_c + a_{yy}}{a_{xy}} - \frac{a_{xy}}{a_c + a_{xx}} \right] = \frac{\partial h}{\partial x} (a_c + a_{xx})^{-1} - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{1}{a_{xy}} - \frac{F_x}{a_c + a_{xx}} + \frac{F_y}{a_{xy}} \quad (34)$$

Moltiplicando tutti i fattori per a_{xy} si arriva alla seguente equazione, che permette di ricavare q_y :

$$q_y \left[(a_c + a_{yy}) - a_{xy} \left(a_c \frac{1}{a_{xy}} + \frac{k_{Sxy}^2}{k_{Sxx}^2} \right)^{-1} \right] = \frac{a_{xy}}{a_c + a_{xx}} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{a_{xy} F_x}{a_c + a_{xx}} + F_y \quad (35)$$

Si introducono ora le seguenti sostituzioni, in modo da poter scrivere le equazioni risoltrici del problema in forma compatta:

$$\Psi_{xx} = - \left[(a_c + a_{xx}) - a_{xy} \left(\frac{a_c}{a_{xy}} + \frac{k_{Sxy}^2}{k_{Syy}^2} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$\Psi_{xy} = - \frac{a_{xy}}{a_c + a_{yy}} \Psi_{xx}$$

$$\Phi_x = \left(-F_x + \frac{a_{xy} F_y}{a_c + a_{yy}} \right) \Psi_{xx}$$

$$\Psi_{yy} = - \left[(a_c + a_{yy}) - a_{xy} \left(\frac{a_c}{a_{xy}} + \frac{k_{Sxy}^2}{k_{Sxx}^2} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$\Psi_{yx} = - \frac{a_{xy}}{a_c + a_{xx}} \Psi_{yy} = \Psi_{xy}$$

$$\Phi_y = \left(-F_y + \frac{a_{xy} F_x}{a_c + a_{xx}} \right) \Psi_{yy}$$

Con le sostituzioni sopra riportate, si arrivano a determinare le equazioni della dinamica nella forma finale utilizzata nel modello:

$$q_x = \Psi_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + \Psi_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + \Phi_x \quad (36)$$

$$q_y = \Psi_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + \Psi_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + \Phi_y \quad (37)$$

Le equazioni dinamiche vengono poi sostituite all'interno dell'equazione di continuità (3), la quale risulta essere funzione solamente del livello h , in quanto i coefficienti Ψ e Φ vengono calcolati sulla base dei livelli e delle portate dell'istante di calcolo precedente, quindi sono noti.

L'equazione di continuità è infine risolta mediante la tecnica degli elementi finiti, che approssima la funzione continua $h(x, y)$ con una funzione discreta lineare a tratti, per cui h diventa nota solo nei nodi della griglia di calcolo, mentre le portate sono definite nel baricentro degli elementi triangolari, arrivando a definire una griglia sfalsata.

L'espressione approssimata di h è ottenuta grazie all'uso delle cosiddette funzioni di forma, ovvero funzioni piramidali a supporto compatto lineari nello spazio che assumono il valore 1 in corrispondenza del nodo in esame. Moltiplicando queste funzioni per ogni singolo valore nodale di h , si ottiene l'andamento lineare approssimato del livello $\bar{h}(x, y)$.

Sostituendo l'espressione di \bar{h} così ottenuta all'interno dell'equazione di continuità, mediante il metodo di Galerkin la soluzione dell'equazione di continuità stessa si riduce alla soluzione di un sistema lineare in $h(i)$, che sono i valori nodali del livello.

Una volta risolto il sistema, si ricostruiscono le portate q_x e q_y utilizzando nuovamente le espressioni della dinamica. A questo punto, note tutte le caratteristiche di interesse nel nuovo

istante di calcolo, si ottiene una nuova stima dei coefficienti Ψ e Φ e si ripetono le varie operazioni, fino alla fine della simulazione.

2.4. Caratteristiche aggiuntive del modello *2DEF*

Come accennato nei paragrafi precedenti, per analizzare il fenomeno di formazione e propagazione delle piene in un territorio di pianura si vuole utilizzare un modello bidimensionale agli elementi finiti in grado di risolvere il sistema di equazioni elencato. Per far questo viene impiegato il modello bidimensionale *2DEF* sviluppato dai proff. A. Defina e L. D'Alpaos unitamente ai ricercatori dell'Università di Padova.

2.4.1. Elementi bidimensionali speciali

Nei sistemi idrografici naturali sono spesso presenti elementi il cui comportamento non può essere descritto in modo semplice e diretto mediante le equazioni precedentemente riportate, come ad esempio le resistenze indotte dalla vegetazione, che si vanno a sovrapporre a quelle del fondo, per le quali è necessario introdurre una formulazione apposita. Così come per gli effetti idrodinamici introdotti dalla presenza di pile e altre forme di ostruzione dell'alveo, qualora il grado di dettaglio della griglia di calcolo non fosse sufficientemente spinto per poter correttamente descrivere l'idrodinamica locale a piccola scala, è necessario introdurre opportune relazioni addizionali che ne tengano conto in modo complessivo. Altri effetti non considerati nelle equazioni presentate nel capitolo precedente sono, ad esempio, la perdita di volume per infiltrazione o la presenza di piccole porzioni di dominio dove il moto può avvenire in pressione; si pensi, a tal proposito, al funzionamento di un ponte quando l'impalcato viene interessato dalle acque in piena.

Per descrivere queste situazioni, per le quali il moto mantiene ancora carattere bidimensionale, sono introdotti alcuni elementi speciali bidimensionali, che sono:

- *maglie in pressione*, che servono per descrivere quella parte di dominio bidimensionale nella quale il moto può avvenire in pressione, ovvero quando la quota della superficie libera tenderebbe a superare un valore limite corrispondente al cielo della porzione di dominio descritta mediante queste maglie speciali;

- *maglie barriera*, utilizzate per simulare la presenza di barriere mobili, il cui funzionamento è sostanzialmente a gradino (aperto/chiuso);
- *maglie permeabili*, utilizzate per la stima dell'infiltrazione secondo lo schema di Horton;
- *maglie vegetazione*;
- *maglie pila*, utilizzate per descrivere l'effetto di una pila in alveo introducendo, qualora il grado di raffinatezza della griglia di calcolo non fosse sufficiente a descrivere adeguatamente il campo di moto turbolento (scia vorticoso) che si sviluppa a tergo dell'ostacolo, una resistenza addizionale S corrispondente a quella offerta dall'ostacolo stesso, la quale viene ripartita equamente tra le n_p maglie interessate dall'ostacolo;
- *maglie porte vinciane*, utilizzate per simulare la presenza di porte vinciane, il cui funzionamento è analogo alle *maglie barriera*;
- *maglie propeller*, utilizzate per simulare la presenza di miscelatori, ovvero di eliche che producono localmente una spinta orientata sul fluido;
- *maglie fabbricato*, impiegate quando le dimensioni caratteristiche dei singoli elementi sono grandi rispetto alle dimensioni di singoli fabbricati facenti parte di un gruppo, ovvero quando la discretizzazione spaziale del dominio non può spingersi fino alla descrizione dei fabbricati presenti sul territorio.

Esistono infine i cosiddetti *nodi speciali*, che comprendono i *nodi inderodibili*, ovvero nodi la cui quota del fondo, per effetto di fenomeni di erosione, non può scendere al di sotto di un valore assegnato, e i *nodi serbatoio*, che rappresentano una immissione/sottrazione di portata localizzata in un nodo del sistema che simula la presenza di un serbatoio di area assegnata.

2.4.2. Elementi monodimensionali *canale*

La rete idrografica minore, oltre ad esercitare un ben definito ruolo nel drenaggio del territorio posto in adiacenza alla rete idrografica principale, rappresenta, nel caso di esondazione, una vera e propria via preferenziale per la propagazione dei fronti di allagamento, verso la quale le acque esondate tendono a confluire, accelerando sensibilmente la velocità di avanzamento dei fronti stessi.

La schematizzazione con elementi bidimensionali della rete idrografica minore presenterebbe non poche difficoltà, poiché da una parte essa porterebbe all'utilizzo di elementi di dimensioni così piccole da rendere assai onerosa la fase di costruzione del reticolo,

dall'altra potrebbe generare l'insorgere di problemi di stabilità ed accuratezza della soluzione numerica, a meno di non adottare passi di integrazione temporale particolarmente ridotti. Per questa ragione il modello consente l'impiego accoppiato di elementi bidimensionali ed unidimensionali, utilizzando questi ultimi per descrivere il funzionamento dei canali della rete minore che drena porzioni di territorio soggette a prosciugamento, o per simulare piccole incisioni profonde in un dominio sostanzialmente bidimensionale come la rete minore di canali di una laguna a marea.

In particolare, nello schema adottato, gli elementi unidimensionali funzionano come canali "in pressione" a sezione costante, fino a quando le zone laterali che li fiancheggiano sono ricoperte dalle acque, e come canali a pelo libero quando il livello scende al di sotto della quota delle zone laterali.

In queste ipotesi una schematizzazione verosimile del campo di moto è quella illustrata nello schema A) di Figura 2.4 ove, per semplicità, si è supposta per il canale una sezione rettangolare. Una schematizzazione alternativa a questa e di più semplice implementazione è quella illustrata nello schema B) della stessa Figura 2.4, nella quale il canale è egualmente considerato, conglobandone però la parte superiore negli adiacenti elementi bidimensionali, che sono estesi fino al suo asse, ed introducendo, per tenere conto della parte inferiore, un elemento unidimensionale destinato a funzionare come un "canale in pressione" a sezione liquida costante nel caso in cui le superfici laterali siano inondate.

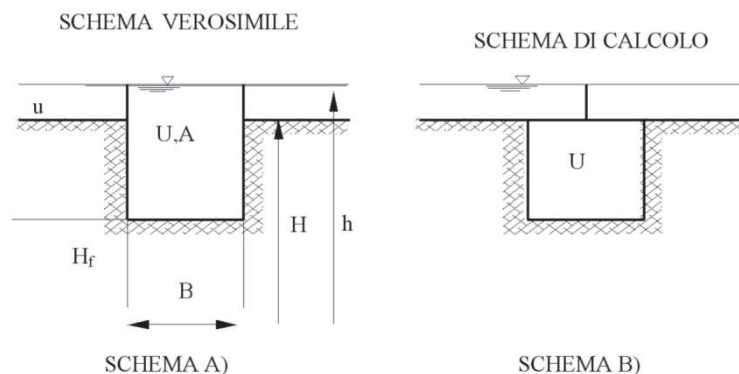


Figura 2.4 - Schema di calcolo dell'elemento monodimensionale *canale*

Nello schema proposto, se gli elementi bidimensionali seguono in parte o in toto il contorno della rete di canali che li solcano, questi ultimi, descritti con elementi di tipo

monodimensionale, possono essere introdotti o eliminati senza apportare modifiche alla struttura del reticolo di calcolo bidimensionale.

Le equazioni del modello, in questo caso, si semplificano ulteriormente: si assume innanzitutto che l'inerzia convettiva sia trascurabile (scompaiono nelle equazioni di partenza i termini di accelerazione convettiva) e si considerano solo sezioni trasversali compatte per le quali sia possibile assumere velocità praticamente uniforme sulla sezione. Sotto queste ipotesi l'equazione del moto e l'equazione di continuità diventano:

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{k_s^2 R_H^{4/3} A^2} = 0 \quad (38)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (39)$$

dove s è l'ascissa curvilinea che descrive planimetricamente l'andamento dell'asse del canale, A è l'area della sezione trasversale, Q è la portata che transita attraverso la sezione del canale, R_H è il raggio idraulico.

Il modello si fonda sulla coesistenza di elementi bidimensionali ed unidimensionali che, in alcune zone, possono entrare in sovrapposizione; per tale motivo, nello scrivere il bilancio di massa per ciascun nodo è necessario considerare che parte della portata che fluisce lungo gli elementi unidimensionali è già stata considerata nel calcolo degli elementi bidimensionali, come visto nella Figura 2.4.

In particolare la frazione di portata ΔQ coinvolta può essere espressa dalla seguente relazione:

$$\Delta Q = B \frac{Y_L(v_L \cdot s) + Y_R(v_R \cdot s)}{2} \quad (40)$$

nella quale B è la larghezza del canale in superficie, v è il vettore velocità relativo agli elementi bidimensionali adiacenti, Y è il volume d'acqua per unità di superficie, s è il versore che individua la direzione dell'asse del canale, e i pedici L ed R individuano, rispettivamente, gli elementi bidimensionali a sinistra e a destra del canale.

La portata che deve essere considerata nel bilancio di massa nodale è pertanto la frazione $Q_\alpha = Q - \Delta Q$ e l'equazione di continuità assume la seguente espressione:

$$\left(1 - \frac{\eta_L + \eta_R}{2}\right) B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial s} = 0 \quad (41)$$

in cui η rappresenta la frazione bagnata del generico elemento bidimensionale adiacente.

Si noti come, se $\eta_L = \eta_R = 0$ (cioè gli elementi bidimensionali adiacenti sono asciutti o assenti), la portata Q_a è proprio uguale a Q e l'equazione di continuità assume la sua forma consueta.

Se invece η_L e η_R sono prossimi ad uno, viene di fatto inibito l'effetto di invaso, che resta confinato alla parte bidimensionale sovrastante. In questo caso dovrebbe comparire nell'equazione di continuità un termine addizionale che descrive il flusso che dal canale entra (o esce) nella parte bidimensionale sovrastante. Analogamente lo stesso flusso dovrebbe essere sottratto agli elementi bidimensionali adiacenti. Con riferimento alla soluzione numerica, che prevede di fatto bilanci di massa nodali, questi contributi, uguali ed opposti, si elidono. Per questo motivo non vengono qui esplicitamente considerati.

2.4.3. Elementi monodimensionali *speciali*

Per simulare con buona approssimazione la presenza di elementi morfologici particolari, quali argini, rilevati stradali o manufatti che possono modificare apprezzabilmente l'evoluzione del fenomeno, il modello uni-bidimensionale prevede l'inserimento di una serie di elementi monodimensionali, detti *tronchi speciali*, che consentono di descrivere correttamente le conseguenze di una manovra di regolazione o di eventuale cedimento del sistema delle numerose opere di difesa longitudinale presenti.

Mediante l'inserimento di tali elementi è così possibile simulare, in particolare, il funzionamento delle arginature, che non potrebbero essere descritte correttamente utilizzando soli elementi bidimensionali, a meno di non appesantire considerevolmente gli oneri di calcolo. I rilevati arginali sono perciò schematizzati come soglie sfioranti, per le quali è sufficiente assegnare le caratteristiche geometriche e il valore del coefficiente di portata, perché il modello determini, al variare delle quote idrometriche, l'andamento della portata che eventualmente tracima la soglia, considerando condizioni sia di efflusso libero sia di efflusso rigurgitato. Utilizzando queste strutture è egualmente possibile simulare gli effetti di un eventuale cedimento, che apra sul corpo arginale o sul rilevato stradale una breccia, che si va progressivamente ampliando per l'azione erosiva della corrente effluente.

Altri tronchi speciali inseriti nello schema di calcolo consentono di simulare il funzionamento di soglie o salti di fondo, di brevi tratti di canale in pressione, come sottopassi o botti a sifone; altri elementi ancora permettono di simulare il funzionamento delle paratoie, che possono operare automaticamente comandate dai livelli o dalla direzione del flusso, come nel caso delle porte vinciane. Infine altri elementi permettono di simulare il funzionamento degli impianti idrovori presenti all'interno del dominio di calcolo.

I valori dei parametri che caratterizzano tutti i dispositivi considerati devono essere inseriti nel file dei dati associato a ciascuna simulazione. Gli stessi parametri possono inoltre essere fatti variare durante una simulazione, in modo da poter rappresentare particolari situazioni che si possono verificare nel corso dell'evento studiato, come ad esempio i cedimenti dei corpi arginali e l'interruzione del funzionamento degli impianti idrovori.

L'insieme dei dati geometrici e delle caratteristiche idrauliche relative agli elementi della *mesh* viene memorizzato all'interno del file *.geo*, che è possibile salvare mediante il software *Incidenze* dopo l'elaborazione del dominio discretizzato. In tale file sono salvate le informazioni generali della *mesh*, ovvero il numero totale di nodi, il numero di nodi speciali, il numero di maglie, il numero di maglie speciali, il numero di canali monodimensionali ed il numero di tronchi speciali. Il file *.geo* riporta anche le classi scelte per quanto riguarda i diversi valori del coefficiente di scabrezza secondo Strickler, e le caratteristiche dei nodi, delle maglie e di tutti gli elementi monodimensionali.

2.5. Condizioni al contorno

Affinché la soluzione del problema di Cauchy sia unica e che il problema risulti determinato, è necessario assegnare alla soluzione le condizioni iniziali e le condizioni al contorno. Un problema idrodinamico relativo alla propagazione di onde di piena in regime di moto lento richiede l'imposizione a monte di un idrogramma delle portate e a valle l'andamento dei livelli o di una scala delle portate. Nelle simulazioni della propagazione delle onde di piena, la procedura da seguire è quella di fornire una condizione iniziale possibilmente equilibrata, quale può essere, ad esempio, quella rappresentata dal moto stazionario determinato da un valore relativamente piccolo di portata fluente nelle diverse sezioni di ingresso e da un prefissato livello o scala delle portate nella sezione di valle. Tale condizione di moto permanente viene raggiunta imponendo delle condizioni al contorno costanti nel tempo.

La procedura di portare a moto permanente un corso d'acqua su fondo completamente asciutto rappresenta la fase più delicata dal punto di vista numerico: essendo il dominio inizialmente asciutto è necessario adottare un passo di integrazione temporale Δt molto più piccolo di quello che sarà poi utilizzato nella simulazione della propagazione dell'onda di piena.

Un espediente è quello di far propagare sull'asciutto una portata più piccola di quella permanente e quindi, una volta che l'alveo si è "bagnato", incrementare progressivamente la portata fino al valore desiderato, lasciando che il sistema si porti a regime.

3. Applicazione del modello a casi schematici

Lo scopo principale di questo elaborato è, come già annunciato, quello di verificare la validità dell'ipotesi di anisotropia introdotta all'interno del modello bidimensionale, con particolare riferimento ad alcuni casi schematici di studio che possano avere una certa rilevanza.

Tra i possibili campi di applicazione, si è scelto di simulare alcuni aspetti idraulici degli ambienti agricoli. Notoriamente, in essi è molto forte l'interazione fra ampie superfici coltivate e le reti di canali artificiali, nelle quali piccole incisioni nel terreno vanno progressivamente a congiungersi fino a formare canali di notevoli dimensioni. La presenza alternata e interconnessa di ampie superfici (con caratteristiche fortemente bidimensionali) e di canali lunghi e relativamente stretti (quindi con caratteristiche fortemente unidimensionali), determina un'eterogeneità di elementi funzionali che, dal punto di vista idraulico, è difficilmente schematizzabile in modo unitario. Indubbiamente, la possibilità di accoppiare elementi bidimensionali e unidimensionali in uno schema di calcolo idrodinamico aumenta le possibilità applicative e la riproduzione fedele dei diversi elementi funzionali presenti sul territorio. D'altra parte, modelli a scala di bacino non possono spingersi ad un grado di dettaglio estremo senza comportare insostenibili oneri computazionali e una eccessiva richiesta di dati. Perciò alcuni fenomeni che si verificano a scale spaziali troppo ridotte per essere esplicitamente simulate nei modelli idrodinamici, possono proficuamente essere inglobate nei cosiddetti "modelli di sottogriglia".

Il modello numerico utilizzato in questo studio adotta già, come ampiamente illustrato, un modello di sottogriglia per le irregolarità del terreno. Qui si vuole esaminare la possibilità di simulare il comportamento idraulico degli elementi più piccoli della rete idraulica, ovvero le

scoline, includendoli in uno specifico modello di sottogriglia mediante l'implementazione dell'anisotropia negli sforzi al fondo. Procedendo in questo modo, si evita di dover generare schematizzazioni del territorio esageratamente dettagliate, pur considerando gli effetti che questi elementi non schematizzati producono sull'idraulica dell'intero sistema schematizzato.

Le scoline sono dei piccoli canali, distribuiti con uno schema ben preciso all'interno delle zone agricole, che hanno lo scopo di raccogliere le acque superficiali e sub-superficiali, correndo paralleli fra loro, convogliando le acque all'interno di un canale ricettore di dimensioni maggiori posto trasversalmente rispetto alla direzione delle scoline stesse.



Figura 3.1 - Esempio di scoline all'interno di un terreno agricolo

Le scoline hanno una sezione generalmente trapezia con dimensioni relativamente contenute, come evidenziato nella Figura 3.1; la pendenza longitudinale di questi canali è circa dello 0.8-1‰, e il loro interasse varia a seconda delle caratteristiche del terreno, assumendo valori maggiori - circa 35-40 metri - per i terreni sciolti rispetto a quelli compatti, per i quali il valore è di circa 20-25 metri.

Le due situazioni schematiche analizzate in questo elaborato riguardano il medesimo fenomeno, ovvero il comportamento idraulico delle scoline quando deve essere smaltita una certa quantità d'acqua presente sul dominio. Le due situazioni di studio differiscono tra loro per le condizioni al contorno: nel primo caso infatti viene immessa una portata d'acqua dal lato posto a quota maggiore, possibile conseguenza di una tracimazione arginale, mentre nel

secondo caso viene considerato un evento di precipitazione omogenea, con diversi valori di intensità, agente sull'intera area di studio.

In entrambi i casi si fa inizialmente riferimento a un modello nel quale le scoline sono rappresentate esplicitamente con elementi monodimensionali *canale* di forma trapezia. Successivamente si analizza il fenomeno eliminando le scoline e considerando la resistenza isotropa del terreno. In seguito si vuole osservare se il comportamento idraulico delle scoline può essere riprodotto senza bisogno di schematizzare esplicitamente le scoline stesse, inglobandole invece nel modello di sottogriglia mediante l'ipotesi di anisotropia degli sforzi al fondo. Il comportamento idraulico delle scoline in questo caso è determinato dal valore assunto dal coefficiente di scabrezza secondo Strickler k_s lungo le due direzioni principali; per determinare il valore che permette di ottenere risultati confrontabili con quelli ricavati rappresentando le scoline tramite gli elementi monodimensionali, viene eseguita un'analisi di sensibilità di tale parametro lungo la direzione orizzontale (direzione prevalente delle scoline).

3.1. Costruzione del dominio di calcolo

Come annunciato nel capitolo precedente, per analizzare il fenomeno di formazione e propagazione delle onde di piena in un territorio di pianura si vuole utilizzare un modello bidimensionale agli elementi finiti in grado di risolvere il sistema di equazioni elencato. A tale scopo viene impiegato il modello bidimensionale *2DEF* sviluppato dai proff. A. Defina e L. D'Alpaos unitamente ai ricercatori dell'Università di Padova.

Il modello matematico deve poi essere applicato ad un generico dominio geografico, per cui viene congiuntamente utilizzata un'interfaccia grafica denominata *Incidenze*, che consente la visualizzazione e l'elaborazione dei dati e dei risultati, e dispone inoltre di un *meshatore* automatico in grado di creare su tutto il dominio, a partire da opportuni dati di input, una discretizzazione ad elementi triangolari.

Si descrive innanzitutto la procedura seguita per la realizzazione del dominio di calcolo in elementi 1D e 2D, e per la definizione dell'insieme dei file necessari per l'esecuzione delle simulazioni.

I file richiesti dal modello per effettuare le simulazioni sono sostanzialmente due:

- un file *.geo* contenente i dati geometrici e le caratteristiche idrauliche relative agli elementi del dominio;

- un file *.sim* contenente le condizioni iniziali, le condizioni al contorno da imporre per la soluzione delle equazioni discretizzate, e tutte le altre informazioni necessarie per le simulazioni.

Il primo passo da affrontare per realizzare il file *.geo* consiste nell'individuare i contorni del dominio di studio, il quale deve contenere tutta l'area che sarà interessata dal fenomeno che si vuole studiare. Nei due casi schematici studiati è stata scelta un'area agricola di forma quadrata con lato pari a 1000 metri; al limite destro e a quello inferiore di tale dominio vengono posti due canali collettori, disposti rispettivamente trasversalmente e longitudinalmente rispetto alle direzione delle scoline, che hanno la funzione di convogliare le acque derivanti dalle scoline stesse e dal terreno, e di portarle in una zona di recapito.

Si costruisce quindi il contorno esterno del dominio in *Autocad* con una polilinea chiusa, sulla quale possono poggiare eventuali polilinee interne, che rappresentano qualsiasi elemento presente nel dominio che abbia una certa rilevanza, come le scoline nel caso in esame.

Ogni polilinea rappresentata deve essere correlata di almeno un'etichetta, che indica la dimensione delle maglie triangolari che si verranno a creare discretizzando il dominio; queste etichette devono essere poste anche in ogni punto di incontro tra due polilinee.

Una volta salvate le polilinee nel formato vettoriale di interscambio *.dxf12*, è possibile importarle nel software *Incidenze* e creare da queste un file dei contorni *.cnt*, sui vertici del quale si andranno ad appoggiare i nodi delle maglie bidimensionali ad elementi triangolari.

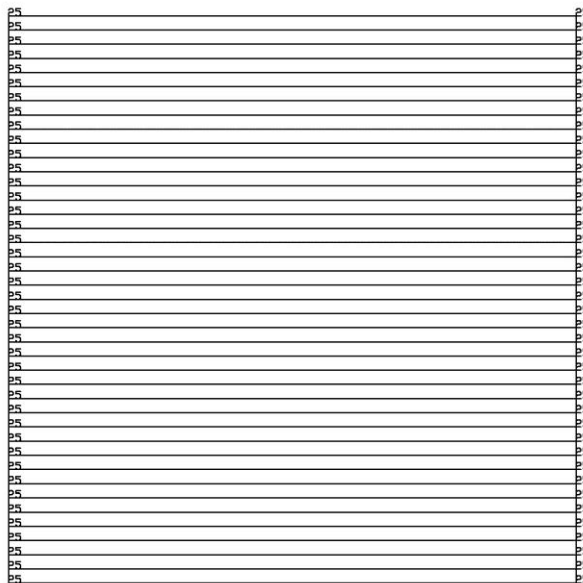


Figura 3.2 - Costruzione delle polilinee in *Autocad* per delimitare il dominio e le scoline, con la presenza delle etichette che definiscono la dimensione delle maglie triangolari

Seguendo questo processo i vertici delle polilinee divengono anche i vertici della griglia di calcolo, quindi è necessario mantenere tra i vertici stessi delle polilinee create un intervallo spaziale coerente con la posizione del dominio e con le etichettature dei nodi delle polilinee stesse.

Il software *Incidenze* richiede, come detto, l'etichettatura dei vertici delle polilinee attraverso dei numeri che definiscono la dimensione media del lato della maglia. Nel caso in esame, essendo il dominio di estensione limitata, l'etichettatura è stata presa in modo da coincidere con l'interasse tra le scoline, quindi pari a 25 metri, sull'intero dominio, come si osserva in Figura 3.2.

Una volta ottenuta la *mesh* del dominio da studiare, il software fornisce vari strumenti che permettono di attribuire a ciascuna maglia del dominio le caratteristiche morfologiche ed idrauliche necessarie, come la quota del fondo, il coefficiente di scabrezza k_s e il parametro che rappresenta le irregolarità del fondo a_r .

Uno degli aspetti più importanti della costruzione del modello riguarda la quotatura delle maglie, dato che un'errata assegnazione può portare a rilevanti errori, specialmente sotto il profilo dei livelli idrici. Per quotare il dominio di calcolo è stato scelto di assegnare una pendenza trasversale, ovvero lungo la coordinata verticale, pari all'1‰, lavorando con quote che variano tra 0 e 1 m, dove il valore più basso è assegnato alle maglie poste nella zona inferiore del dominio, come rappresentato dalla Figura 3.3.

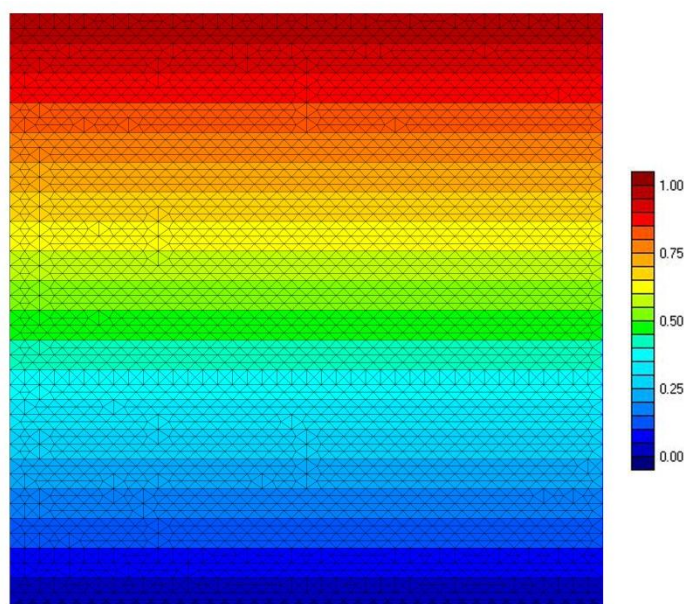


Figura 3.3 - Rappresentazione grafica tramite il software *Incidenze* della quota del fondo delle maglie del reticolo all'interno del file *.geo*

Altro parametro fondamentale da attribuire a ciascun elemento del reticolo di calcolo è rappresentato dal coefficiente di scabrezza. Tale parametro non è tuttavia definibile a priori se non come ordine di grandezza sulla base delle indicazioni di letteratura: assumendo infatti un significato “concettuale” è evidente che l’individuazione del valore più rappresentativo della situazione reale non possa che passare attraverso una procedura di calibrazione.

Molto spesso nella pratica non si dispone di sufficienti informazioni tali da permettere di utilizzare la calibratura del modello per determinare k_s , per cui si sfruttano le indicazioni contenute in letteratura, facendo riferimento al tipo di terreno che costituisce le aree studiate, all’eventuale tipo di rivestimento e alle caratteristiche della vegetazione dove presente. Nel caso in esame il coefficiente di scabrezza k_s è stato preso pari a $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per quanto riguarda il terreno, e pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per quanto riguarda i canali monodimensionali.

Il parametro che esprime l’ampiezza delle irregolarità del fondo a_r è stato ipotizzato costante, per tutta la *mesh* di calcolo, e pari a 0.3 m, in linea con valori ricavati mediante l’analisi di rilievi Lidar ad alta definizione effettuata su aree con analoga destinazione d’uso. Considerato il fatto che il valore delle asperità di fondo tende a diminuire al diminuire delle dimensioni delle maglie, e che le maglie di più grandi dimensioni vanno a rappresentare quelle porzioni di territorio prevalentemente pianeggianti, è plausibile ipotizzare di ben schematizzare le irregolarità al fondo attribuendo un valore costante di a_r pari a 0.3 m.

Come riportato precedentemente, i canali di larghezza contenuta, quindi sia le scoline sia i canali collettori, possono essere schematizzati attraverso l’introduzione di elementi monodimensionali, in modo da evitare la presenza di maglie bidimensionali di dimensioni troppo ridotte che potrebbero facilmente portare all’instabilità della soluzione.

Per poter creare un canale monodimensionale in *Incidenze* bisogna innanzitutto sceglierne la forma della sezione (per punti, rettangolare, circolare, chiusa o trapezia), in base alla quale vengono richiesti gli altri dati necessari alla realizzazione del canale stesso. Nel caso in esame è stata scelta la forma trapezia, caratteristica della maggior parte delle scoline reali, come anche dei canali artificiali; assegnando tale forma, vengono richiesti il coefficiente di scabrezza k_s , preso pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per tutti i canali, l’ampiezza delle irregolarità del fondo a_r , e le dimensioni della sezione, ovvero:

- la quota del fondo h_f , considerata inferiore di 0.5 m rispetto alla quota del terreno per quanto riguarda le scoline, mentre inferiore di 1.5 m per quanto riguarda i canali collettori;
- la larghezza del fondo B , presa pari a 0.5 m per le scoline e pari a 1 m per i canali collettori;

- la scarpa delle sponde, presa pari a 0.5 per le scoline e pari a 1 per i collettori.

Al file *.geo* deve poi essere associato un file *.sim* che contiene tutte le informazioni necessarie alla simulazione, come:

- la durata della simulazione *TT*, che viene presa pari a 30 ore, in modo che il moto all'interno delle scoline diventi permanente. Per far sì che questo accada, il modello deve arrivare a convergenza, e alcune simulazioni richiedono una durata maggiore, fino a 210 ore;
- il passo temporale di calcolo *dt* e di stampa *dtprt*;
- il tempo di attivazione dei termini convettivi *dtconvet* e dei termini di Reynolds *dtRey*, presi entrambi pari a 150 s;
- la porosità *poroeta*, presa pari a 0.05;
- le condizioni iniziali, ovvero il livello iniziale presente nel dominio, imposto con valori differenti pari a -0.2, -0.3, -0.4 e -0.5 m;
- le tabelle per l'assegnazione dei livelli e delle portate nel tempo;
- le condizioni al contorno, ovvero il numero di nodi con livello assegnato e con portata assegnata.

```

simulazione taratura da 23/04/2009 12.00 a 25/04/2009 0.00
2.0 versione
***** DATI GENERALI DELLA SIMULAZIONE *****
108000. 3. 600. 150. 150. 0 TT,dt,dtprt,dtconvet,dtRey,ivideo (,TTzero,nfileNoConv)
0.05 0.2 0.1 poroETA, Csmago, Cverticale (,ReyTauMAX)
NoCanali.geo
NoCanali_aniso_ks30_h-0.2_q2.out
1 calcolo l'idrodinamica (,tollGCM)
***** LISTA DELLE VARIABILI DA STAMPARE *****
1 livello Ho
1 portate qx,qy,Q1D,Q tronchi speciali
0 eddy viscosity di maglia
0 sforzy di reynolds
0 quota del fondo nodale
0 portate specifiche al fondo
0 concentrazione nodale sospensione
0 portata di filtrazione e volume immagazzinato
0 altezza d'onda
0 direzione dell'onda
0 radiation stresses
0 concentrazione nodale diffusione
0 accelerazioni convettive
0 curvature
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto

```

Figura 3.4 - Dati generali della simulazione all'interno del file *.sim*

Le tabelle per l'assegnazione dei livelli e delle portate sono caratterizzate da un valore che rappresenta il passo temporale ΔT_{tab} , espresso in secondi, con cui vengono scanditi i valori, e a cui dovrà fare riferimento il numero di valori inseriti nella tabella, che deve coprire l'intera durata della simulazione, per cui il numero di valori inseriti è pari a $(TT/\Delta T_{tab} + 1)$, dove l'ultimo termine tiene in considerazione il fatto che il primo valore della tabella si riferisce all'istante temporale 0 s.

Nelle situazioni analizzate sono presenti due tabelle, dove la prima è riferita ai livelli, mentre la seconda si riferisce alle portate per quanto riguarda la prima simulazione, mentre si riferisce all'intensità di precipitazione efficace per la seconda simulazione.

Nella tabella riferita ai livelli, il valore viene preso costante e pari al valore desiderato per tutti gli istanti di tempo. Nella tabella riferita alla portata invece il primo valore viene preso pari a 0 m³/s, dato che all'istante iniziale non viene immessa acqua nel dominio, mentre gli altri valori sono tutti uguali e pari a 2, 3 o 4 m³/s a seconda della simulazione.

```

***** CONDIZIONI INIZIALI *****
-0.2      livello iniziale
0         eventuale correzione livelli
0         eventuale lettura da restart
NoCanali_aniso_h-02_q2_ks30_50ore.bup  nome file restart
***** TABELLE DATI VARIABILI NEL TEMPO *****
2        tabelle per l'assegnazione dei livelli e delle portate
1800.    101      tabella 1
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2
1800.    101      tabella 2
0.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0  2.0
2.0

```

Figura 3.5 - Condizioni iniziali e tabelle per l'assegnazione dei livelli e delle portate all'interno del file .sim

Nel caso in cui si considera l'evento di precipitazione, si predispongono di un file *piogge.dat* nel quale è indicato il numero della tabella, all'interno del file *.sim*, che raccoglie i dati di pioggia efficace espressi in mm/h, che sostituisce quindi la tabella contenente i valori di portata immessa dal lato superiore della *mesh* nella prima simulazione. Vengono utilizzati tre diversi valori di intensità di precipitazione efficace pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h, che forniscono una portata totale nel dominio pari rispettivamente a 2, 3 e 4 m³/s.

```

***** TABELLE DATI VARIABILI NEL TEMPO *****
2      tabelle per l'assegnazione dei livelli e delle portate
1800.      101      tabella 1
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
-0.2
1800.      101      tabella 2
0.0  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2  7.2
7.2

```

Figura 3.6 - Tabelle per l'assegnazione dei livelli e dei dati di precipitazione efficace all'interno del file *.sim* quando si considera un evento di precipitazione omogeneo

Per quanto riguarda le condizioni al contorno invece, bisogna specificare il numero di nodi a cui viene assegnato un livello o una portata, e il numero del nodo stesso, ricavabile dal software *Incidenze*, affiancato dal numero della tabella a cui fa riferimento e da un numero che rappresenta la costante moltiplicativa del livello o della portata. Questa costante viene presa pari ad 1 per i livelli, mentre per le portate assume valori differenti a seconda del numero di nodi in cui viene frazionata la portata stessa; nel caso in esame, essendo assegnata la portata nei 41 nodi posti al limite superiore del dominio, viene frazionata in modo che l'1.25% della portata totale vada sul primo e sull'ultimo nodo, mentre sui restanti ne vada il 2.5% (Figura 3.7).

```

***** CONDIZIONI AL CONTORNO *****
1          numero di nodi con livello assegnato
1680 1    1.0
41        numero di nodi con portata assegnata
121 2    0.0125
120 2    0.025
124 2    0.025
122 2    0.025
123 2    0.025
362 2    0.025
361 2    0.025
363 2    0.025
364 2    0.025
366 2    0.025
365 2    0.025
604 2    0.025
603 2    0.025
605 2    0.025
606 2    0.025
607 2    0.025
608 2    0.025
847 2    0.025
846 2    0.025
845 2    0.025
849 2    0.025
848 2    0.025
850 2    0.025
1088 2   0.025
1089 2   0.025
    
```

Figura 3.7 - Condizioni al contorno all'interno del file *.sim*

Per inserire l'ipotesi di anisotropia degli sforzi deve essere presente nella cartella della simulazione un file denominato *ks_aniso.dat*, il quale permette di considerare distintamente il valore di k_s in direzione longitudinale e in direzione trasversale, imponendo anche l'angolo di rotazione dell'asse longitudinale rispetto ad x , come si vede in Figura 3.8. Il primo valore assunto da k_s è riferito alle maglie del dominio, che quindi risulta diverso lungo le due direzioni nel caso in cui si considerano gli sforzi anisotropi del fondo, mentre risulta analogo se si considera la resistenza isotropa del terreno. Il secondo valore è invece riferito ai canali monodimensionali, che assumono sempre lo stesso valore in entrambe le direzioni.

```

***** DATI PER ANISOTROPIA Ks *****
1          calcolo con anisotropia ks
ks LONGITUDINALE
75.0 30.0
ks TRASVERSALE
15.0 30.0
angolo di rotazione asse longitudinale rispetto a x (ANTIORARIO in GRADI)
0.0 0.0
    
```

Figura 3.8 - Dati per l'anisotropia all'interno del file *ks_aniso.dat*

Una volta realizzati il file *.geo* e il file *.sim* è possibile eseguire la simulazione con il modello *2DEF* (Figura 3.9), che fornisce un file dei risultati *.out* che può essere analizzato con il software

Incidenze, verificando l'andamento nel tempo di diversi parametri, come il tirante, il livello e la portata.

```

***** dati generali della simulazione
*** La simulazione inizia a t= 0.00 s
*** 0 file di maglie con termini convettivi
disattivati vicino a nodi con Q assegnata
durata 30.00 (ore) dt stampa= 600.00 (s)
***** lista variabili da stampare
***** condizioni iniziali
non prevista hot start e assegno H= -0.200000000000000
***** tabelle dati variabili nel tempo
***** condizioni al contorno
1 nodi con livello assegnato
41 nodi con portata assegnata
0 nodi con scala portate assegnata
0 maglie variabili nel tempo
0 tronchi variabili nel tempo
***** dati relativi al vento
non previsto il vento
***** dati relativi alla filtrazione
non prevista filtrazione
***** dati relativi al trasporto solido
***** dati per il trasporto e diffusione
***** dati relativi al moto ondoso
non previsto moto ondoso
===== FINE LETTURA FILE .SIM
n,nS,m,mS,nc,nS 3282 0 6401 0 81 0
Calcolo con anisotropia nei ks
===== FINE LETTURA FILE .GEO
attivo i termini convettivi dopo 150.000000000000
attivo i termini di Reynolds dopo 150.000000000000
nome del file OUT NoCanali_aniso_ks40_h-0.2_q2.out
nome del file BUP 2DEFtmp_bup
--- per continuare premere CR ---
    
```

Figura 3.9 - Interfaccia del modello 2DEF per eseguire la simulazione

Il parametro usato per confrontare le simulazioni è la portata all'istante finale della simulazione stessa, misurata in alcune sezioni di riferimento, come mostrato nella Figura 3.10.

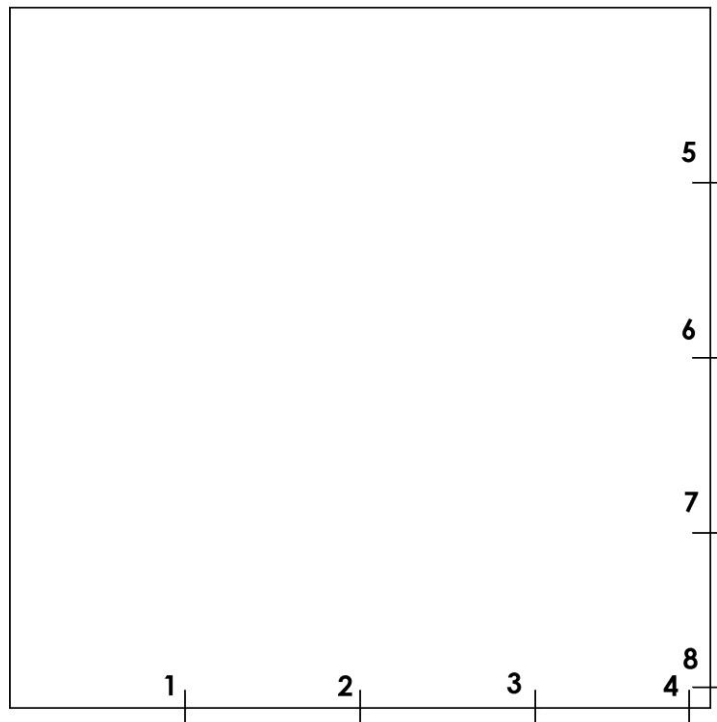


Figura 3.10 - Sezioni di riferimento per la misura della portata nei canali collettori

La sezione principale è quella di chiusura di entrambi i canali collettori, che permette di analizzare la ripartizione della portata tra gli stessi canali. Inoltre viene studiata anche la porzione di dominio che risulta allagata in seguito all'evento di riferimento, in modo da verificare se i tre casi di studio comportano le medesime conseguenze sul dominio stesso, in entrambe le simulazioni.

E' possibile inoltre calcolare la percentuale di area allagata mediante un eseguibile creato ad hoc (*BUP_AnalizzaLivelli.exe*). Esso richiede il file *.bup* riferito all'istante finale della simulazione da analizzare, che rappresenta un file di restart contenente le informazioni numeriche sui livelli nodali della superficie libera e sulle portate che interessano i diversi elementi di calcolo. Il file *.bup* permette di far ripartire la simulazione dall'istante a cui il file stesso è riferito. Il file *BUP_AnalizzaLivelli.exe* permette, oltre al calcolo della percentuale di area allagata, anche il confronto tra le aree allagate di due file *.bup* che si riferiscono a simulazioni differenti, realizzando un nuovo file *.bup* che permette di visualizzare la differenza di livello e le differenze di portata (in entrambe le direzioni principali) in ogni punto della griglia di calcolo (Figura 3.11).

```

1=Analizza file singolo
2=Confronta 2 file
1
nome del file .GEO
Filespec is NoCanali.geo
nome del file .BUP 1
Filespec is NoCanali_aniso_ks40_h-0.2_q2.bup

Atot,Vmed
1000000.0000      -0.3693

Aflood,Atet,Vnuet,Umed
0.0000      21794.7229      0.0000      0.0000
Premere INVIO per terminare il programma
    
```

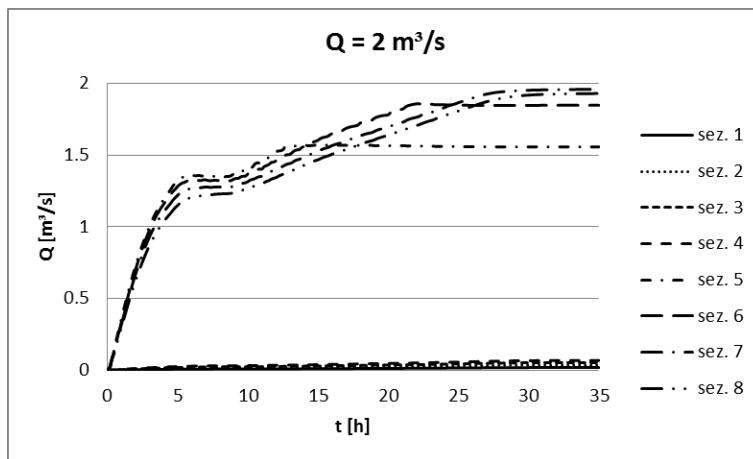
Figura 3.11 - Interfaccia del file *BUP_AnalizzaLivelli*

3.2. Prima simulazione: immissione di portata dal lato superiore

Per sondare la dipendenza della soluzione dalla condizione al contorno imposta al nodo di valle, sono state effettuate simulazioni analoghe a quella presentata, nelle quali è stato fatto variare il livello al contorno imposto al nodo di valle nell'intervallo che va da -0.2 a -0.5 m. Poiché i risultati ottenuti sono del tutto analoghi in termini di ripartizione della portata, con l'unica differenza che il moto impiega maggior tempo a raggiungere la condizione permanente, è da ritenere che il livello imposto a valle non influisca sensibilmente sui risultati ottenuti.

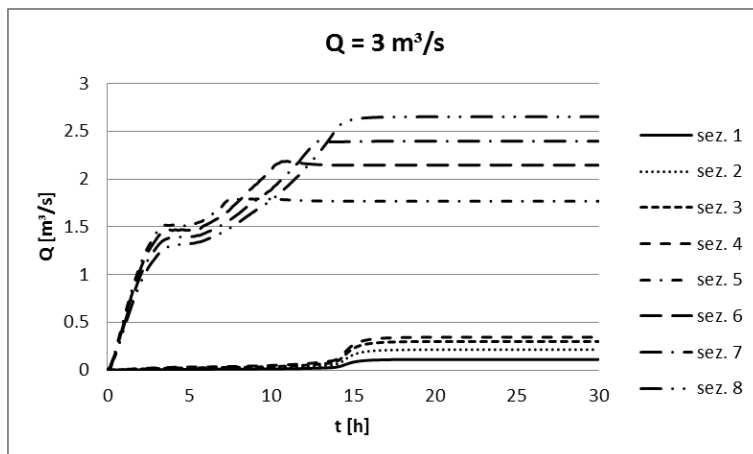
Vengono quindi di seguito riportati i diagrammi dell'andamento delle portate nel tempo nelle diverse sezioni di Figura 3.10, i valori di tali portate all'istante finale della simulazione, e la suddivisione in percentuale della portata tra i due canali collettori, riferiti solamente ad un livello iniziale pari a -0.2 m.

3.2.1. Scoline con elementi monodimensionali *canale*



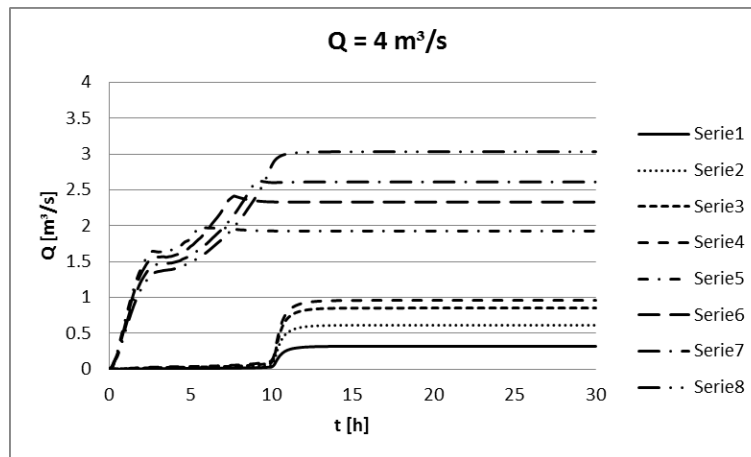
Q [m³/s] a t=35 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.02	0.03	0.05	0.07	1.56	1.85	1.96	1.93

Q canale orizzontale	3%
Q canale verticale	97%



Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.11	0.21	0.30	0.34	1.77	2.15	2.40	2.65

Q canale orizzontale	11%
Q canale verticale	89%



Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.32	0.61	0.85	0.96	1.93	2.33	2.61	3.03

Q canale orizzontale	24%
Q canale verticale	76%

In Figura 3.12 e nella relativa Tabella 3.1 è riportata la suddivisione della portata all'interno dei due collettori al variare della portata immessa nel dominio. Si osserva come, passando da 2 a 4 m³/s, aumenta la percentuale di portata presente nel canale collettore orizzontale e diminuisce quella nel canale verticale, dato che la maggior quantità d'acqua non può essere trattenuta dalle prime scoline, che recapitano la portata all'interno del collettore verticale, ma impegna tutte le scoline presenti nel dominio.

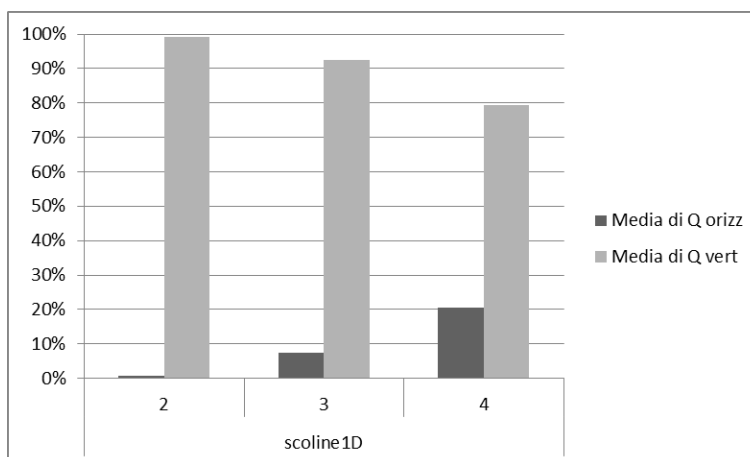


Figura 3.12 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.1 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
scoline1D	10%	90%
2	1%	99%
3	8%	93%
4	21%	80%

Si riportano ora i valori, espressi in percentuale, dell'area allagata, divisi in base al valore della portata immessa.

La frazione di area allagata è stata calcolata considerando anche il modello di sottogriglia per la distribuzione irregolare delle quote del terreno. Come si osserva dalla Figura 3.13, all'aumentare della portata in ingresso aumenta l'area di dominio allagata, in quanto le scoline non riescono a trattenere la maggior quantità d'acqua, che si distribuisce in parte sul terreno.

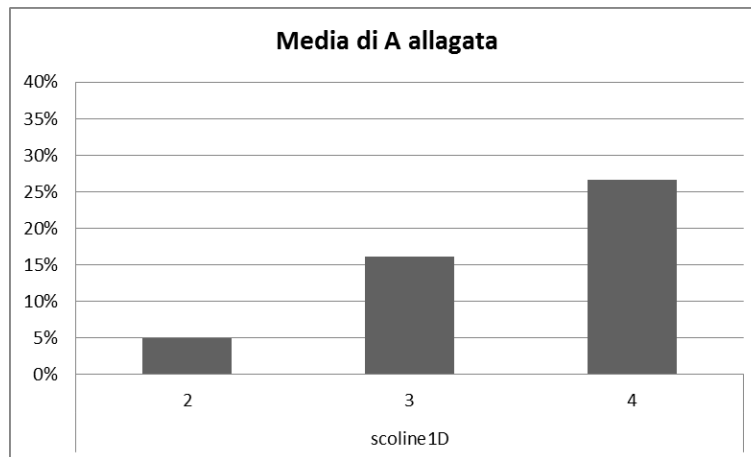


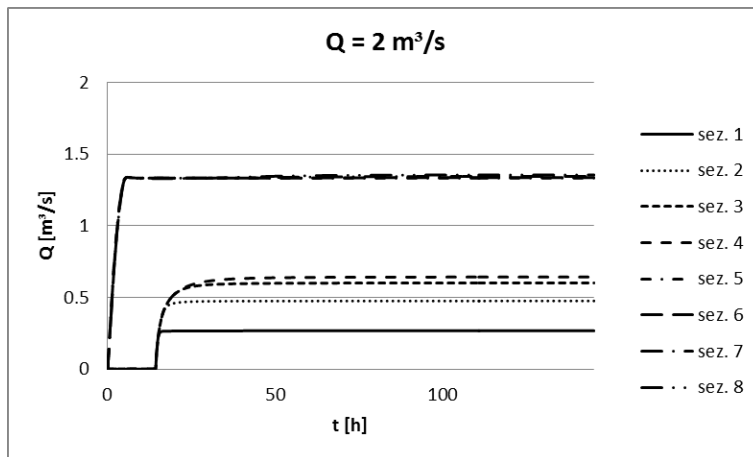
Figura 3.13 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.2 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Media di A allagata	
scoline1D	16%
2	5%
3	16%
4	27%

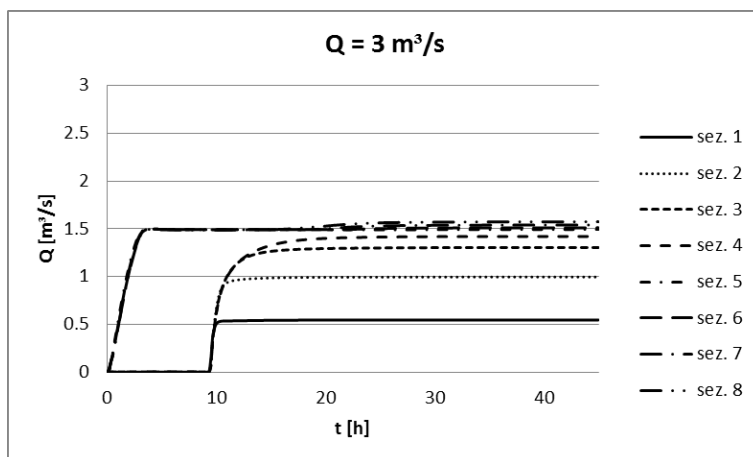
3.2.2. Simulazione con resistenza isotropa del terreno

In questo caso, essendo la resistenza del terreno isotropa, la presenza delle scoline di fatto non viene considerata: l'acqua si distribuisce analogamente in entrambe le direzioni principali e non trova le facili vie di sfogo verso i canali collettori normalmente offerte dalle scoline, comportando un maggiore allagamento del terreno. Per quanto riguarda il caso di portata minore, la durata della simulazione è decisamente superiore rispetto a quella degli altri casi poiché il moto impiega un tempo maggiore per giungere alla condizione permanente.



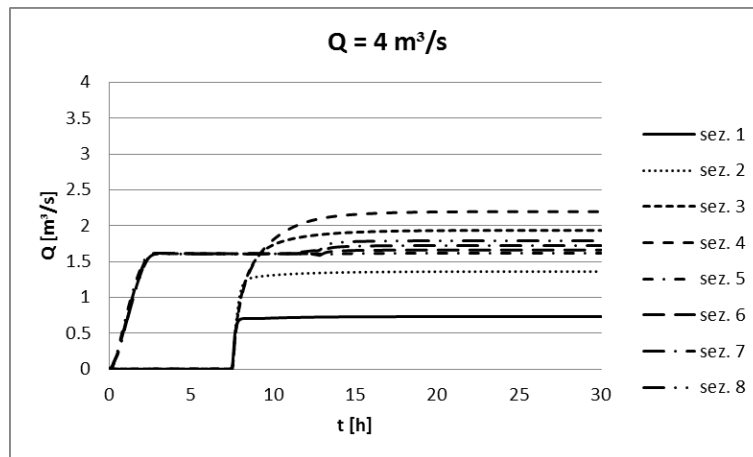
Q [m³/s] a t=145 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.27	0.48	0.60	0.64	1.33	1.34	1.34	1.35

Q canale orizzontale	32%
Q canale verticale	68%



Q [m³/s] a t=45 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.55	1.00	1.30	1.42	1.49	1.51	1.54	1.57

Q canale orizzontale	47%
Q canale verticale	53%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.73	1.36	1.94	2.20	1.62	1.66	1.72	1.79

Q canale orizzontale	55%
Q canale verticale	45%

Si osserva come anche in questo caso, all'aumentare della portata in ingresso, aumenti la portata presente all'interno del canale collettore orizzontale, ma, a differenza del caso precedente, la portata presente in tale canale assume valori di una certa rilevanza, arrivando a superare quella che defluisce nel canale verticale (Figura 3.14).

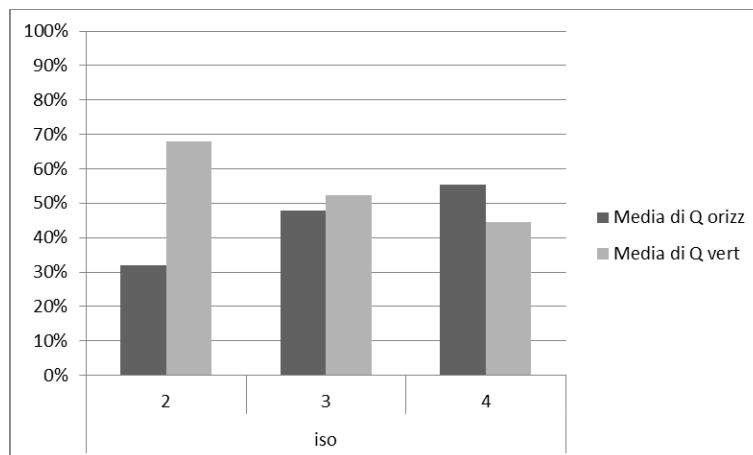


Figura 3.14 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Questo è dovuto al fatto che, eliminati gli elementi monodimensionali *canale*, il terreno offre la medesima resistenza in entrambe le direzioni, per cui l'acqua si espande principalmente lungo la pendenza del terreno (direzione verticale dall'alto verso il basso).

Tabella 3.3 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
iso	45%	55%
2	32%	68%
3	48%	52%
4	56%	45%

In riferimento a quanto detto, anche la percentuale di dominio allagata aumenta rispetto al caso precedente, poiché l'acqua, non trovando vie di deflusso preferenziali, si espande maggiormente sul dominio e quindi, in buona parte, sul terreno.

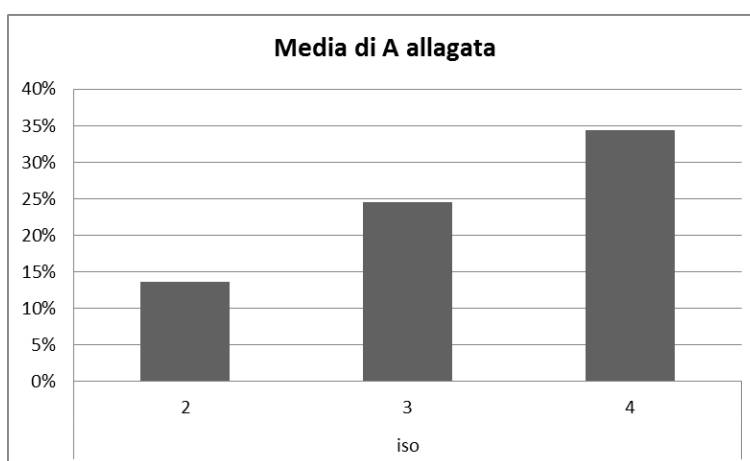


Figura 3.15 - Area di dominio allagata nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

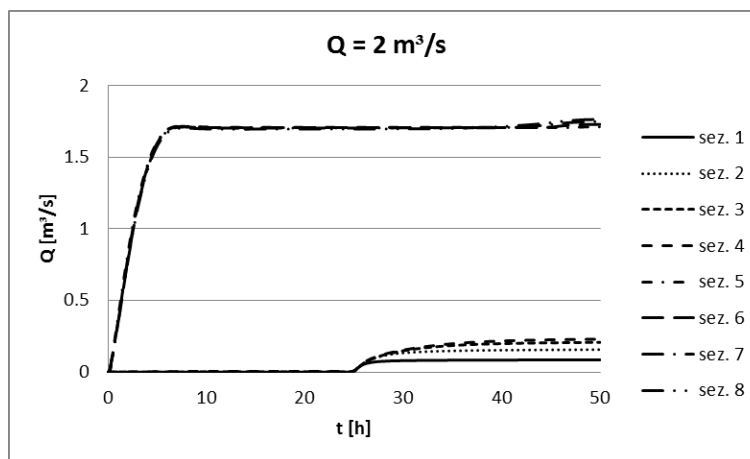
Tabella 3.4 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Media di A allagata	
iso	24%
2	14%
3	24%
4	34%

3.2.3. Simulazione con resistenza anisotropa del terreno

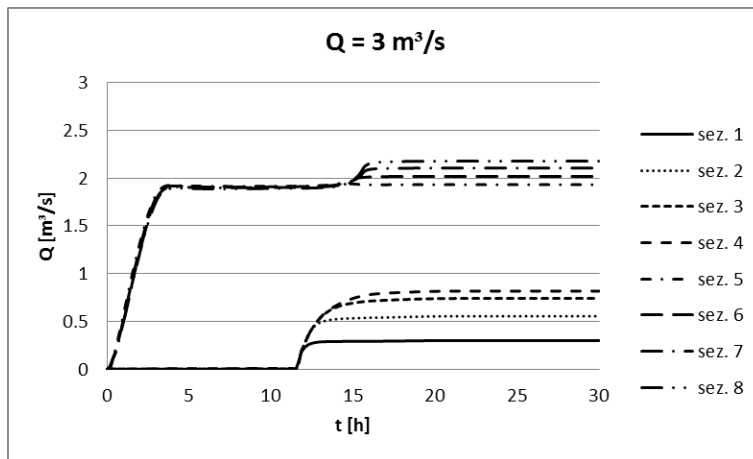
Per questa simulazione è stata effettuata un'analisi di sensibilità riguardo il coefficiente di scabrezza secondo Strickler. In particolare, si è cercato di individuare per quale valore del k_s in direzione orizzontale (quella delle scoline) la simulazione con ipotesi di anisotropia fornisca risultati il più possibile vicini a quelli ottenuti con l'utilizzo degli elementi monodimensionali canale. I valori trattati in direzione longitudinale sono pari a 30, 45, 60 e 75 m^{1/3}/s, con un'ulteriore verifica assumendo un valore molto grande, pari a 150 m^{1/3}/s, effettuata per osservare se i valori assumono importanti modifiche o se restano simili a quelli ottenuti con valori più bassi del coefficiente, mentre in direzione verticale k_s viene sempre preso pari a 15 m^{1/3}/s.

3.2.3.1. Simulazione con k_s pari a 30 m^{1/3}/s



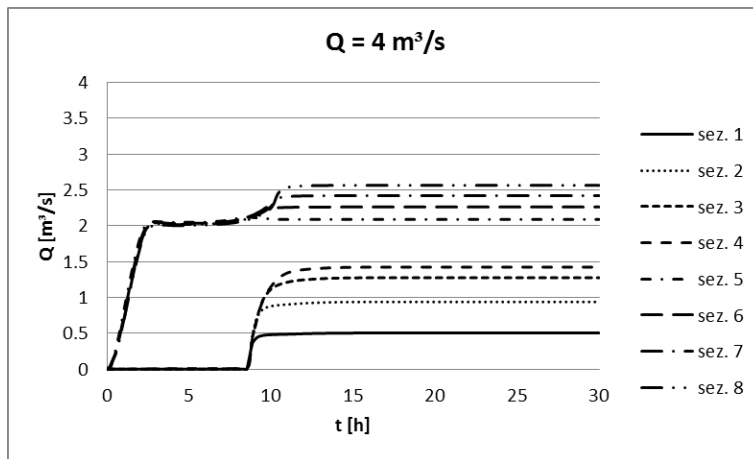
Q [m ³ /s] a t=50 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.09	0.16	0.21	0.23	1.71	1.73	1.75	1.76

Q canale orizzontale	12%
Q canale verticale	88%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.30	0.55	0.74	0.82	1.93	2.02	2.10	2.18

Q canale orizzontale	27%
Q canale verticale	73%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.50	0.94	1.28	1.42	2.09	2.26	2.42	2.56

Q canale orizzontale	36%
Q canale verticale	64%

Rispetto al caso con resistenza isotropa del terreno, questa situazione si avvicina molto al caso in cui le scoline sono rappresentate tramite gli elementi monodimensionali *canale*. Si osserva infatti che la maggior parte della portata defluisce all'interno del canale collettore orizzontale, anche se i valori non sono analoghi a quelli ottenuti nel primo caso, come si osserva dalla Figura 3.16.

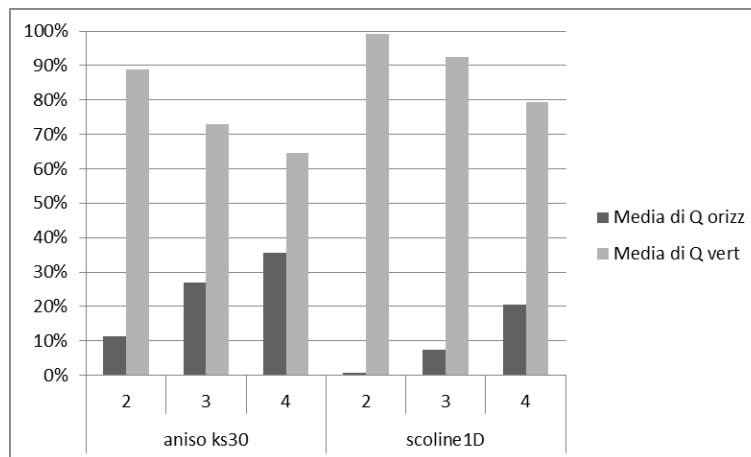


Figura 3.16 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore, confrontata con quella ottenuta rappresentandole mediante canali 1D

Tabella 3.5 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks30	25%	75%
2	11%	89%
3	27%	73%
4	36%	65%

Anche per quanto riguarda l'area di dominio allagata questo caso si avvicina molto alla prima situazione analizzata, in quanto, rispetto al caso con resistenza isotropa del terreno, quest'area diminuisce dato che l'acqua incontra minore resistenza in direzione orizzontale. Le vie preferenziali che di fatto si vengono a creare in tale direzione svolgono una funzione analoga a quella svolta dalle scoline che scaricano l'acqua raccolta nel canale verticale.

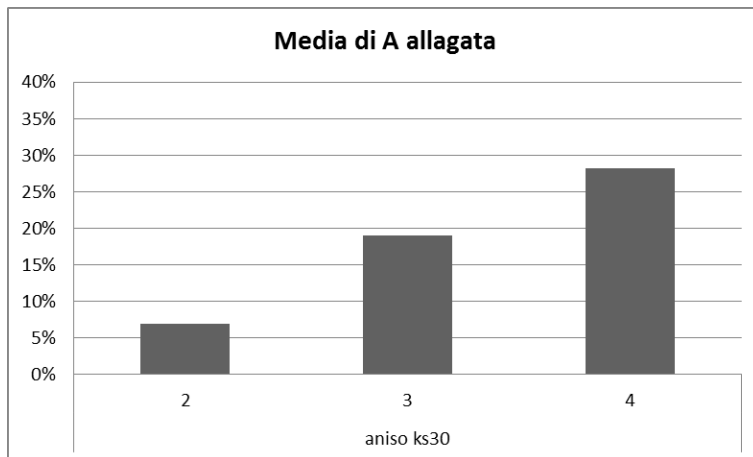
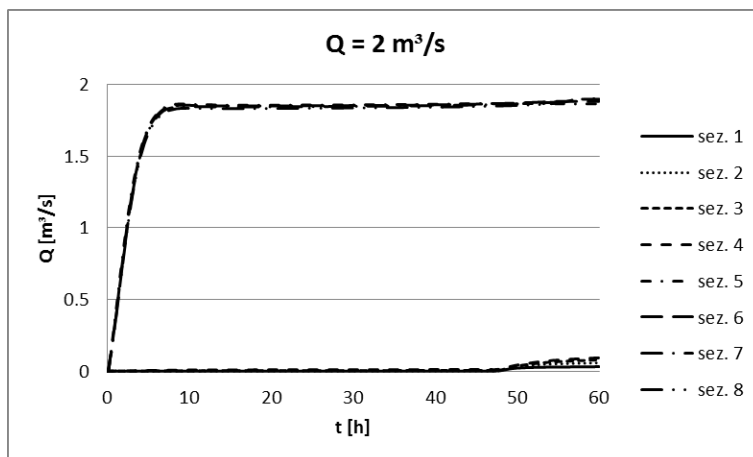


Figura 3.17 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.6 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

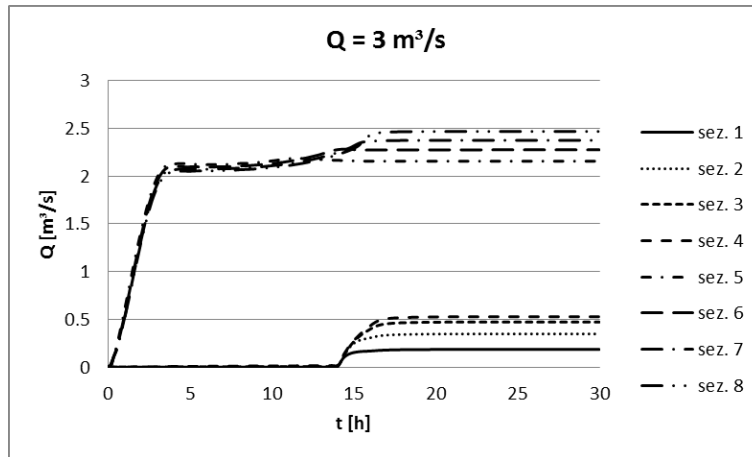
Media di A allagata	
aniso ks30	18%
2	7%
3	19%
4	28%

3.2.3.2. Simulazione con k_s pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



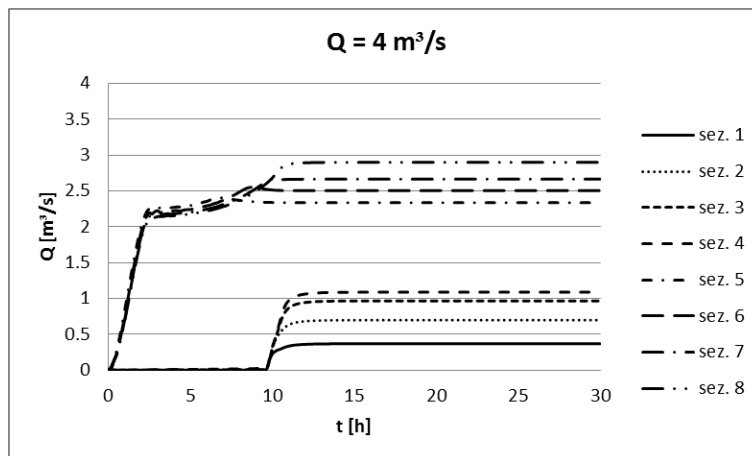
Q [m ³ /s] a t=60 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.03	0.06	0.08	0.09	1.86	1.88	1.90	1.90

Q canale orizzontale	5%
Q canale verticale	95%



Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.18	0.35	0.47	0.53	2.15	2.27	2.37	2.47

Q canale orizzontale	18%
Q canale verticale	82%



Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.37	0.70	0.97	1.09	2.34	2.50	2.67	2.90

Q canale orizzontale	27%
Q canale verticale	73%

Si osservano le analoghe conseguenze viste nel caso precedente, con la differenza che, aumentando il valore del coefficiente di scabrezza longitudinale, ci si avvicina maggiormente alla prima situazione analizzata, dato che l'acqua incontra sempre minor resistenza al deflusso in direzione orizzontale.

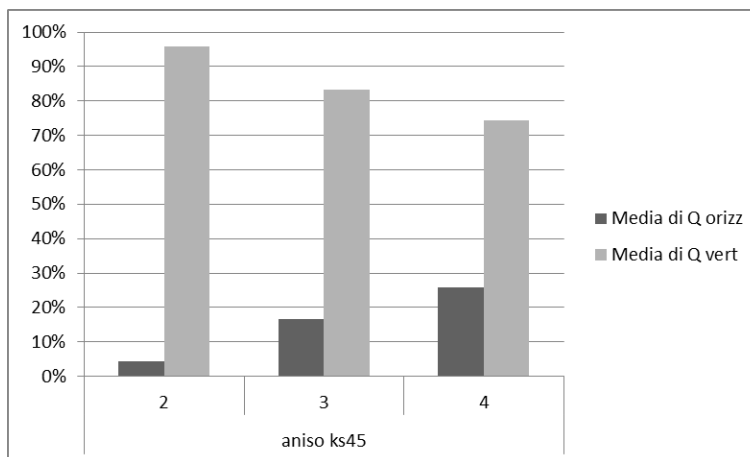


Figura 3.18 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.7 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks45	16%	84%
2	4%	96%
3	17%	83%
4	26%	74%

In base a quanto detto in precedenza, aumentando il valore di k_s in direzione longitudinale si ha una diminuzione dell'area di dominio allagata, in quanto l'acqua defluisce più facilmente in direzione orizzontale, andando ad alimentare il canale collettore verticale.

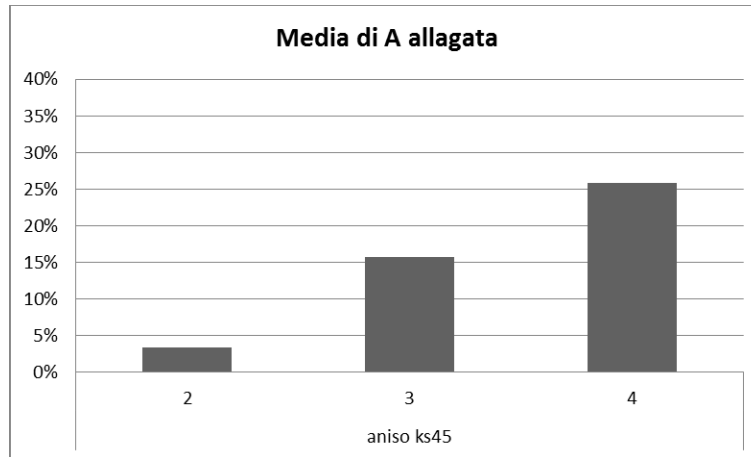
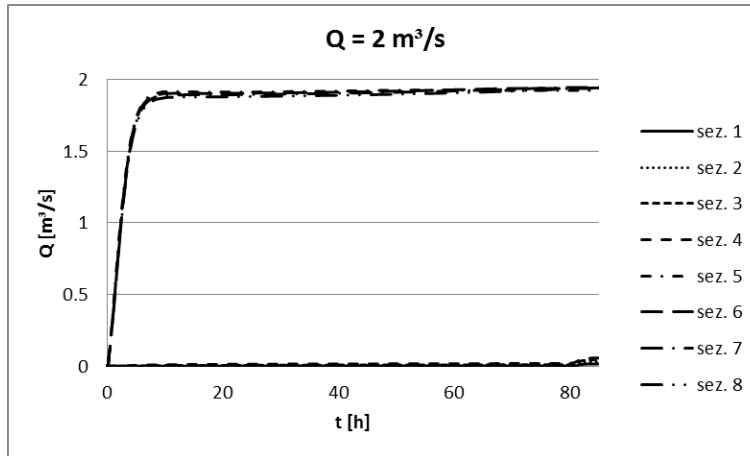


Figura 3.19 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.8 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

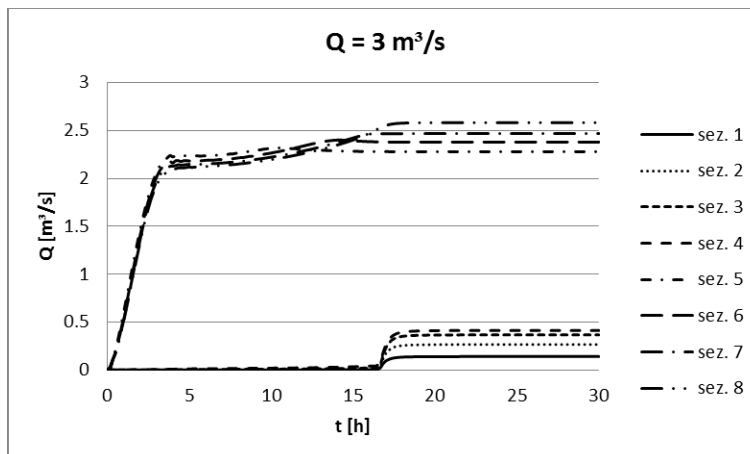
Media di A allagata	
aniso ks45	15%
2	3%
3	16%
4	26%

3.2.3.3. Simulazione con k_s pari a $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



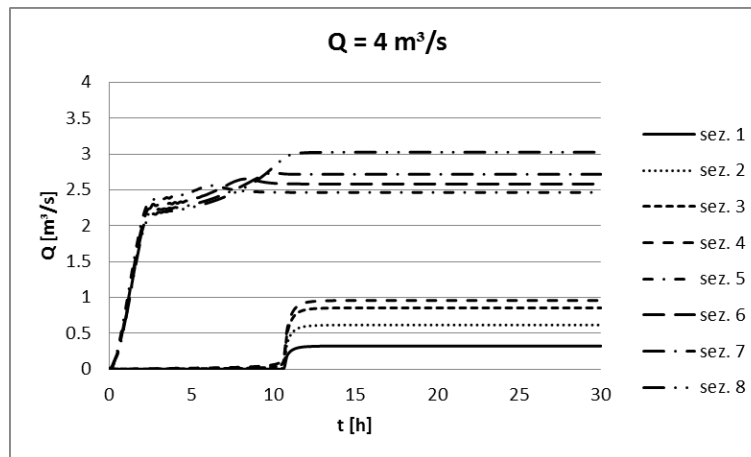
Q [m³/s] a t=85 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.02	0.03	0.04	0.06	1.92	1.94	1.94	1.94

Q canale orizzontale	3%
Q canale verticale	97%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.14	0.26	0.37	0.41	2.28	2.38	2.47	2.58

Q canale orizzontale	14%
Q canale verticale	86%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.32	0.62	0.85	0.96	2.47	2.58	2.72	3.03

Q canale orizzontale	24%
Q canale verticale	76%

Aumentando il valore del k_s longitudinale si assottiglia sempre più la differenza con i risultati ottenuti utilizzando gli elementi monodimensionali *canale*, anche se, avvicinandosi al valore cercato di tale coefficiente, le variazioni sono meno rilevanti, come si osserva dalle immagini seguenti.

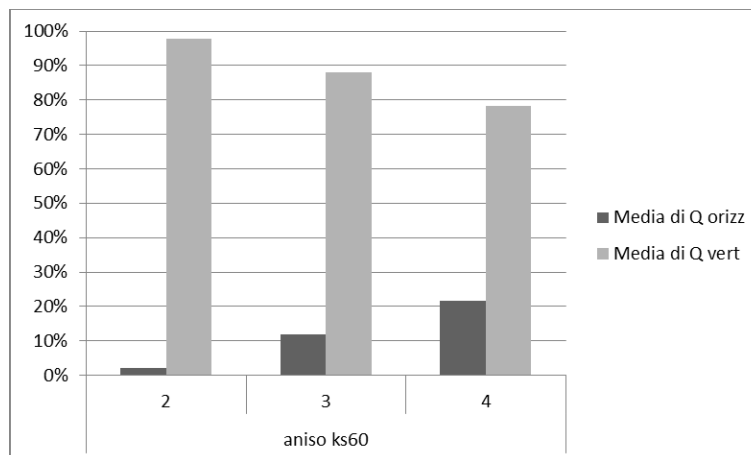


Figura 3.20 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.9 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks60	12%	88%
2	2%	98%
3	12%	88%
4	22%	78%

Quanto detto si manifesta anche per l'area di dominio allagata, in quanto la differenza rispetto al caso precedente è minima.

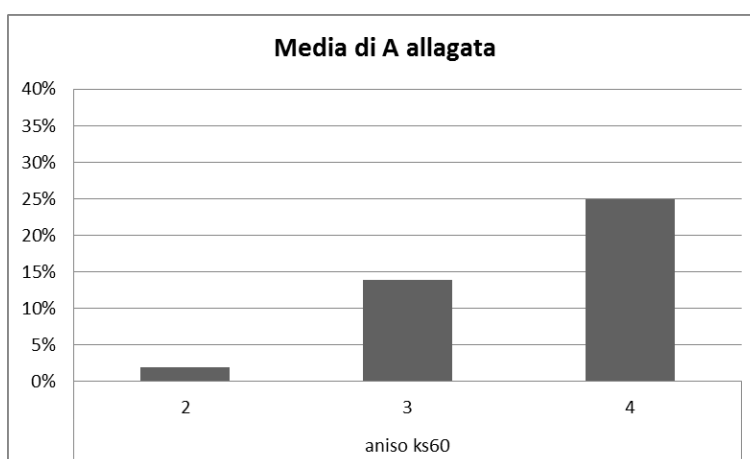
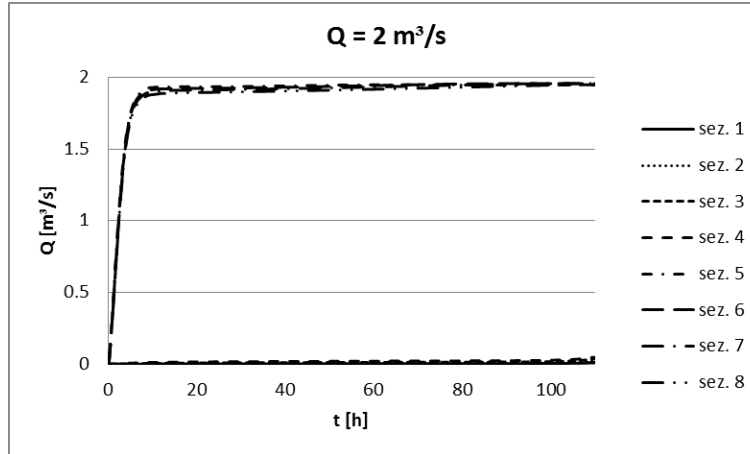


Figura 3.21 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.10 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

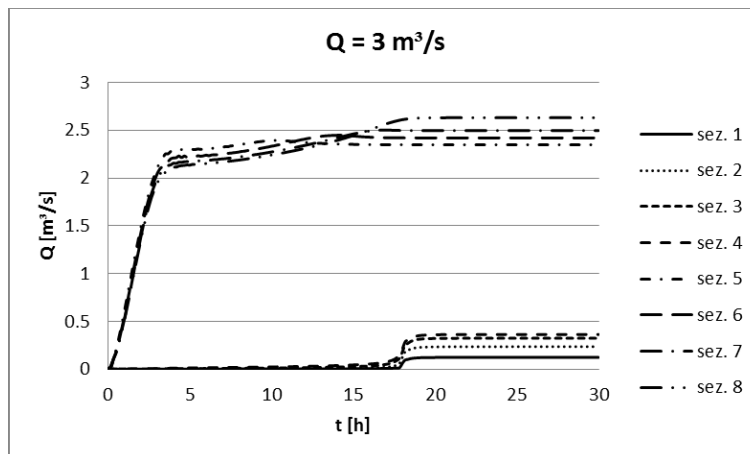
	Media di A allagata
aniso ks60	14%
2	2%
3	14%
4	25%

3.2.3.4. Simulazione con k_s pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



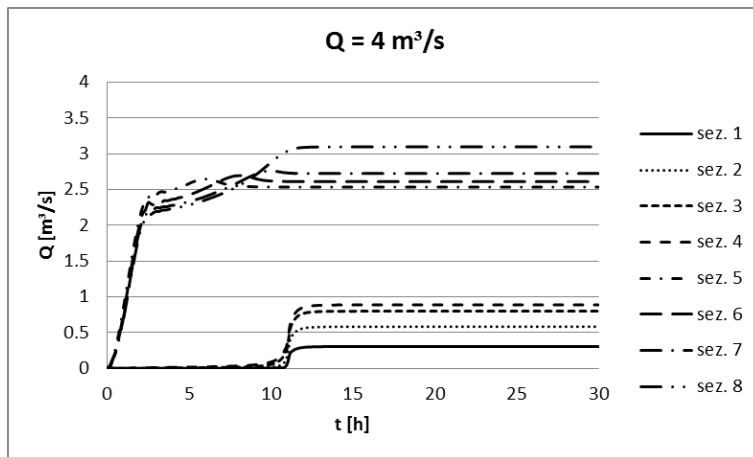
Q [m³/s] a t=110 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.01	0.02	0.04	0.05	1.95	1.96	1.96	1.95

Q canale orizzontale	2%
Q canale verticale	98%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.12	0.23	0.32	0.36	2.35	2.42	2.50	2.63

Q canale orizzontale	12%
Q canale verticale	88%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.30	0.58	0.80	0.89	2.53	2.61	2.72	3.10

Q canale orizzontale	22%
Q canale verticale	78%

Con questo valore di k_s longitudinale il comportamento è molto simile a quello ottenuto con gli elementi monodimensionali *canale*, per cui può essere ritenuto il valore di riferimento per quanto riguarda questa modalità di rappresentare gli effetti delle scoline.

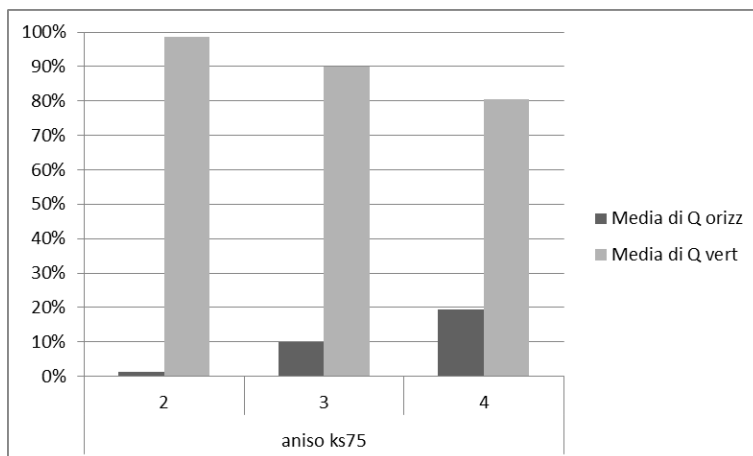


Figura 3.22 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.11 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks75	10%	90%
2	1%	99%
3	10%	90%
4	20%	81%

L'area di dominio allagata diminuisce ulteriormente rispetto al caso precedente, ma ormai le differenze sono minime, e i valori sono molto simili a quelli ottenuti con gli elementi monodimensionali *canale*.

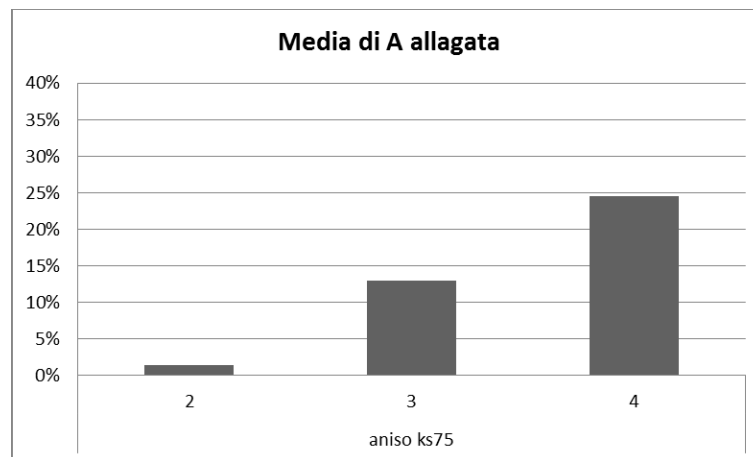
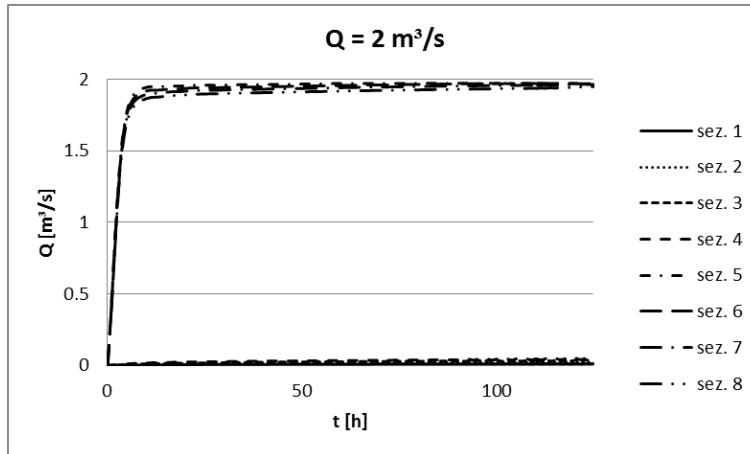


Figura 3.23 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.12 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

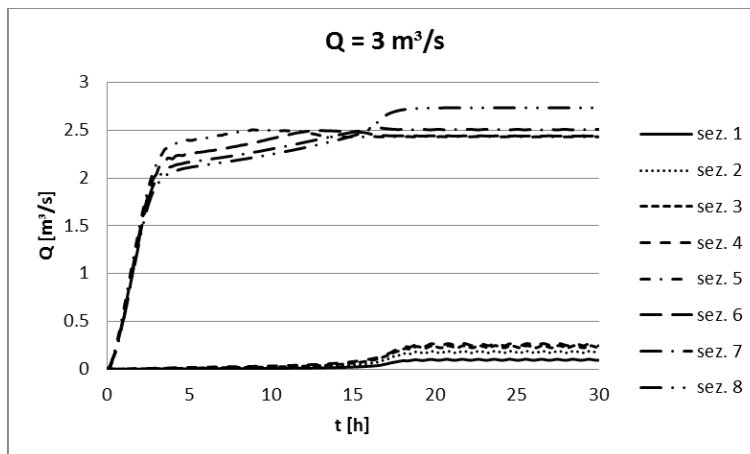
	Media di A allagata
aniso ks75	13%
2	1%
3	13%
4	25%

3.2.3.5. Simulazione con k_s pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



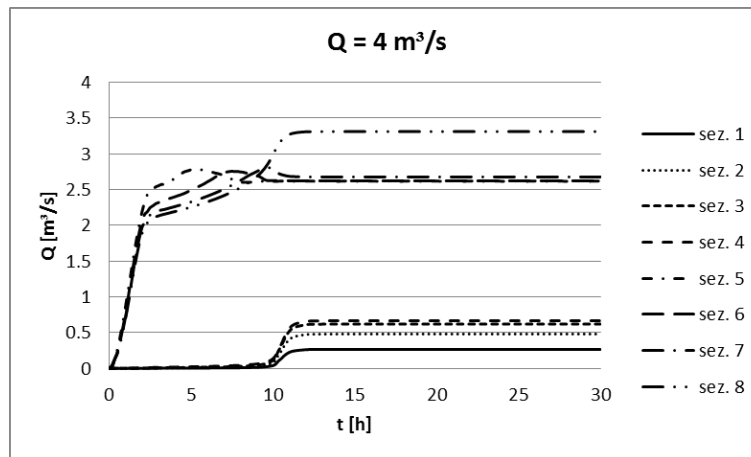
Q [m³/s] a t=125 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.01	0.02	0.04	0.05	1.97	1.97	1.96	1.95

Q canale orizzontale	2%
Q canale verticale	98%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.09	0.17	0.22	0.25	2.43	2.44	2.51	2.73

Q canale orizzontale	8%
Q canale verticale	92%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.26	0.48	0.62	0.67	2.62	2.62	2.68	3.31

Q canale orizzontale	17%
Q canale verticale	83%

Quest'ultima prova è stata effettuata per osservare se, aumentando di molto il valore del coefficiente di scabrezza, la risposta del modello si modifichi ancora di molto rispetto al caso con k_s pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

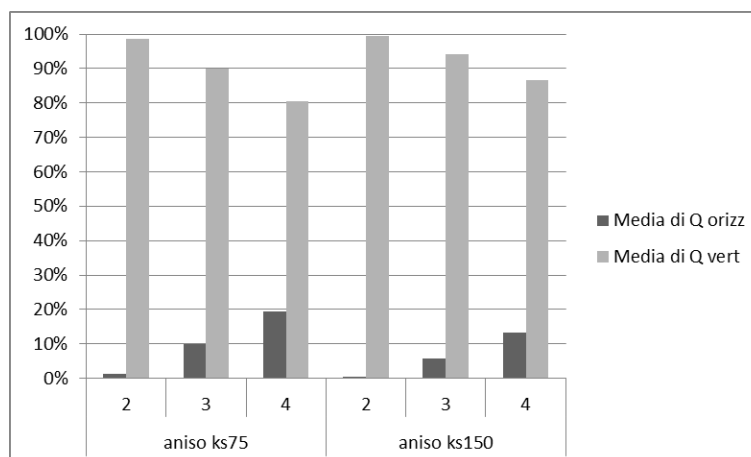


Figura 3.24 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore, a confronto con quella ottenuta con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Analizzando la Figura 3.24 e l'annessa Tabella 3.13 si osserva come la differenza tra i due casi sia limitata, per cui $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ può essere considerato come valore di riferimento per il coefficiente di scabrezza longitudinale.

Tabella 3.13 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks150	7%	94%
2	1%	100%
3	6%	94%
4	13%	87%

Anche per quanto riguarda l'area di dominio allagata le differenze rispetto al caso precedente sono minime.

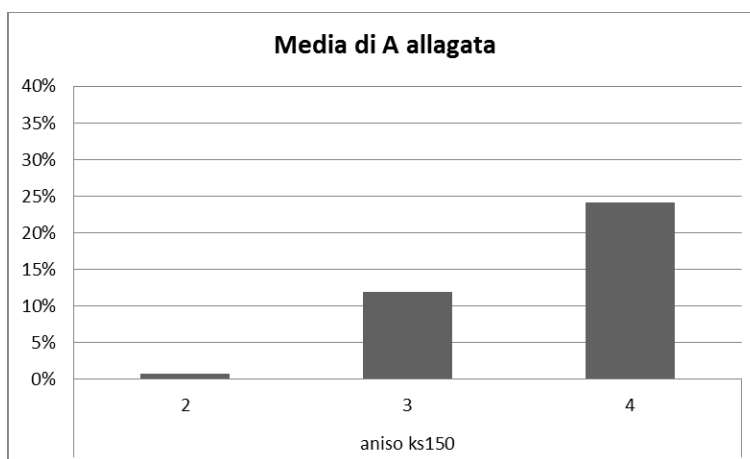


Figura 3.25 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.14 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Media di A allagata	
aniso ks150	12%
2	1%
3	12%
4	24%

3.2.4. Confronto

Analizzando i risultati ottenuti con i diversi valori di k_s longitudinale si osserva che il comportamento che più somiglia a quello ottenuto schematizzando esplicitamente le scoline mediante canali 1D risulta con il coefficiente di scabrezza secondo Strickler di $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Questo può essere osservato analizzando la Figura 3.26 e la conseguente Tabella 3.15, in cui si confronta la ripartizione, espressa in percentuale, della portata nei due canali collettori nei diversi casi in cui si considera l'anisotropia degli sforzi al fondo.

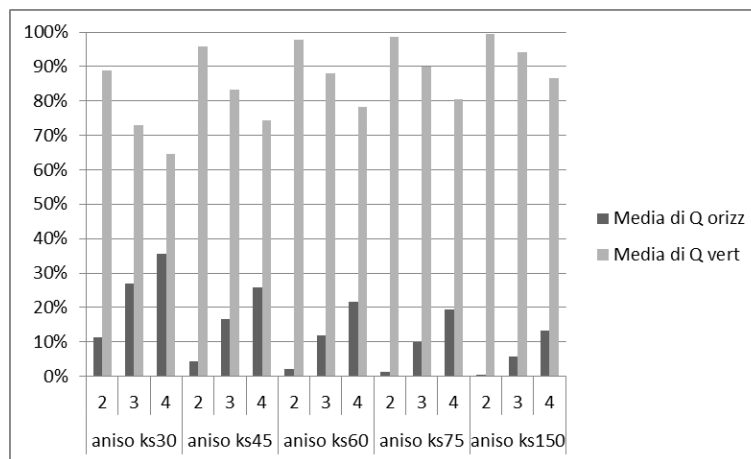


Figura 3.26 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nei diversi casi in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e $4 \text{ m}^3/\text{s}$) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.15 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nei diversi casi in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks30	25%	75%
2	11%	89%
3	27%	73%
4	36%	65%
aniso ks45	16%	84%
2	4%	96%
3	17%	83%
4	26%	74%
aniso ks60	12%	88%
2	2%	98%
3	12%	88%
4	22%	78%
aniso ks75	10%	90%
2	1%	99%
3	10%	90%
4	20%	81%
aniso ks150	7%	94%
2	1%	100%
3	6%	94%
4	13%	87%

Si confrontano i risultati ottenuti con i tre diversi casi di studio, facendo riferimento, per quanto riguarda il caso con l'ipotesi di anisotropia, a quanto ottenuto con k_s pari a 75 m^{1/3}/s in direzione longitudinale.

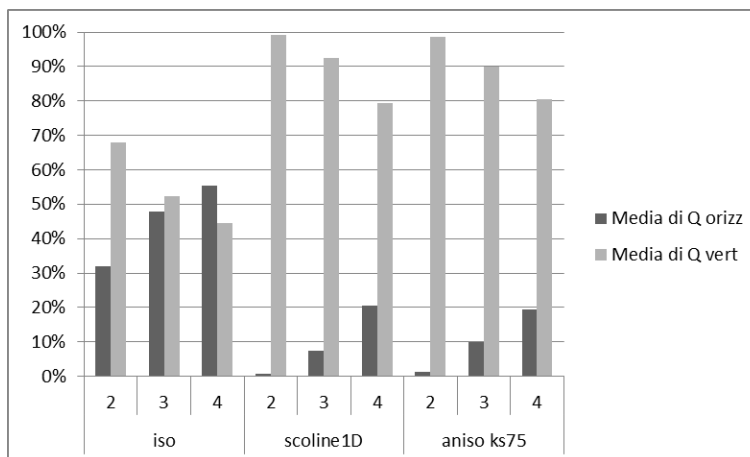


Figura 3.27 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nei tre casi principali, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.16 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nei tre casi principali, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

	Media di Q orizz	Media di Q vert
iso	45%	55%
2	32%	68%
3	48%	52%
4	56%	45%
scoline1D	10%	90%
2	1%	99%
3	8%	93%
4	21%	80%
aniso ks75	10%	90%
2	1%	99%
3	10%	90%
4	20%	81%

Analizzando la Figura 3.27 si osserva che il comportamento dell'acqua ottenuto con l'utilizzo degli elementi monodimensionali viene bene rappresentato mediante il modello di sottogriglia introducendo l'ipotesi di resistenza anisotropa del terreno, mentre ipotizzando che l'acqua si diffonda analogamente in entrambe le direzioni principali il comportamento idraulico risulta molto differente, con una notevole variazione nella suddivisione della portata tra i due canali collettori.

Ciò avviene in quanto, introducendo l'anisotropia, l'acqua incontra minore resistenza scorrendo longitudinalmente, che non trasversalmente, rispetto alle scoline, per cui defluisce maggiormente nella direzione delle scoline stesse, e conseguentemente meno lungo il terreno tra due scoline. Una maggior quantità d'acqua viene perciò recapitata all'interno del canale collettore verticale, mentre una quantità minore raggiunge il collettore orizzontale.

La miglioria introdotta dall'anisotropia si può osservare anche per quanto riguarda la percentuale di area allagata.

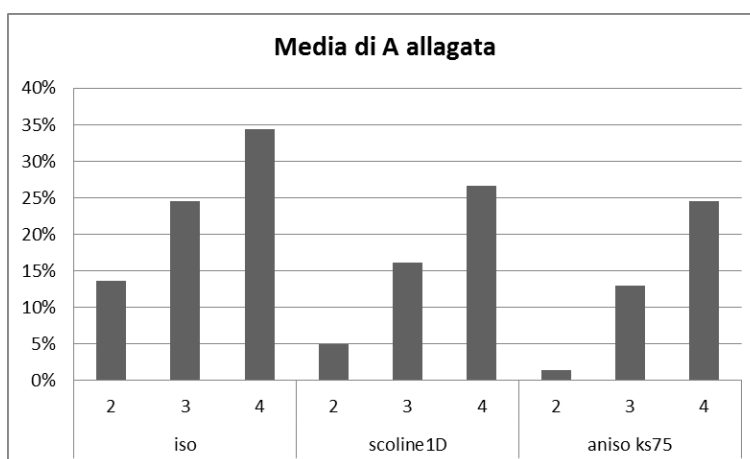


Figura 3.28 - Area di dominio allagata nei tre casi principali, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Tabella 3.17 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nei tre casi principali, a seguito dell'immissione di portata (2, 3 e 4 m³/s) dal lato posto a quota maggiore

Media di A allagata	
iso	24%
2	14%
3	24%
4	34%
scoline1D	16%
2	5%
3	16%
4	27%
aniso ks75	13%
2	1%
3	13%
4	25%

Analizzando i valori sopra riportati si osserva come la scelta di considerare un'analogia resistenza del terreno in entrambe le direzioni principali sia fonte di errori anche nel considerare la porzione di dominio allagata, in quanto, in questa situazione, risulta molto maggiore l'area bagnata rispetto ad entrambe le altre simulazioni, le quali invece presentano risultati poco discordanti tra loro.

La Figura 3.29 rappresenta il massimo tirante d'acqua presente sul dominio nel caso in cui non si considerano le scoline, ovvero introducendo la resistenza isotropa del terreno, in seguito all'immissione di una portata di 4 m³/s dal lato posto a quota maggiore, con il livello

pari a -0.2 m. Le immagini degli altri due casi principali non vengono riportate in quanto non sono presenti aree con tirante medio maggiore di zero.

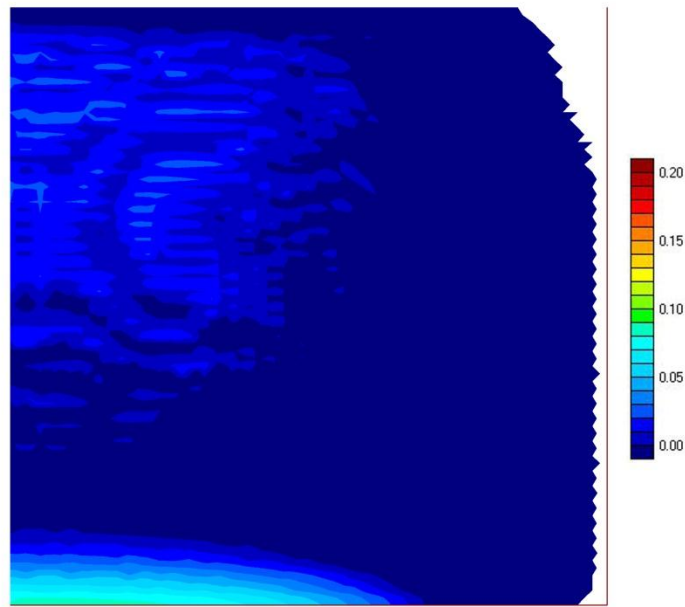


Figura 3.29 - Massimo tirante d'acqua sul dominio nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, a seguito dell'immissione di 4 m³/s di portata dal lato posto a quota maggiore con il livello iniziale pari a -0.2 m

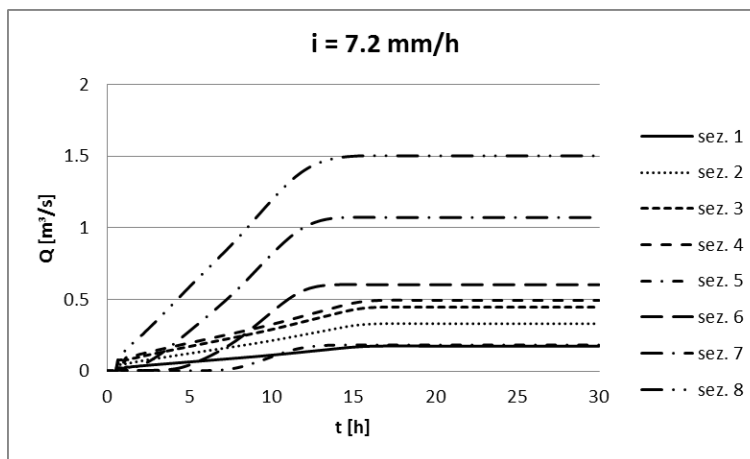
3.3. Seconda simulazione: evento di precipitazione efficace

In questa simulazione si considera un evento di precipitazione efficace agente sull'intera griglia di calcolo, in condizione di moto permanente. Vengono utilizzati tre diversi valori di intensità di precipitazione efficace pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h, che forniscono una portata totale alla sezione di uscita del dominio pari rispettivamente a 2, 3 e 4 m³/s.

Anche per questa applicazione sono state effettuate simulazioni analoghe a quella presentata, nelle quali è stato fatto variare il livello al contorno imposto al nodo di valle nell'intervallo che va da -0.2 a -0.5 m. Poiché i risultati ottenuti sono del tutto analoghi in termini di ripartizione della portata, è da ritenere che il livello imposto a valle non influisca sensibilmente sui risultati ottenuti.

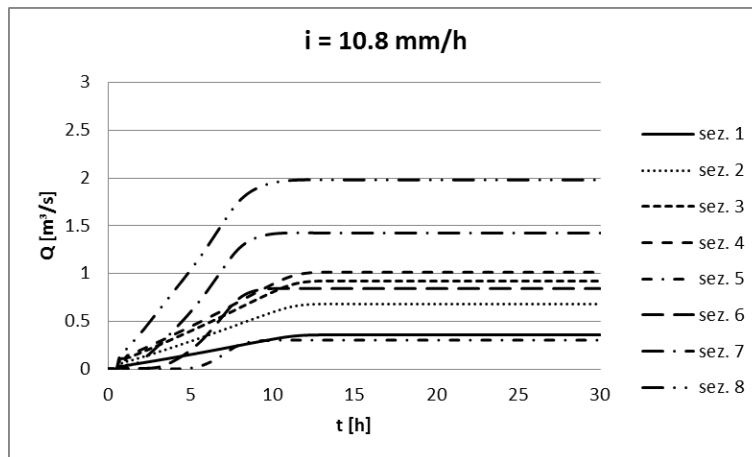
La durata delle simulazioni è in tutti i casi pari a 30 ore, dato che il moto riesce sempre ad arrivare in condizione permanente entro tale limite di tempo, a differenza di quanto accadeva nella prima simulazione.

3.3.1. Scoline con elementi monodimensionali *canale*



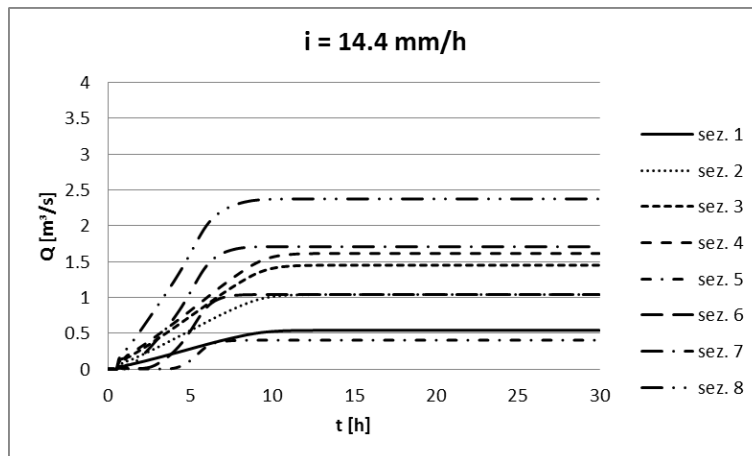
Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.17	0.33	0.45	0.49	0.18	0.60	1.07	1.50

Q canale orizzontale	25%
Q canale verticale	75%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.36	0.68	0.92	1.01	0.30	0.84	1.42	1.98

Q canale orizzontale	34%
Q canale verticale	66%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.54	1.04	1.45	1.61	0.40	1.04	1.71	2.38

Q canale orizzontale	40%
Q canale verticale	60%

Confrontando i risultati ottenuti con quanto visto nella simulazione precedente, si osserva che anche in questo caso, all'aumentare del parametro di interesse, ovvero dell'intensità di precipitazione, aumenta la portata presente nel canale collettore orizzontale.

La principale differenza consiste nel fatto che in questa situazione, anche con un valore basso di intensità di precipitazione, la portata all'interno del canale orizzontale assume valori di una certa rilevanza. Questo è dovuto al fatto che l'evento di precipitazione agisce fin dal primo istante su tutto il dominio, per cui parte dell'acqua cade direttamente sul canale orizzontale o nelle immediate vicinanze, mentre nella simulazione precedente la portata veniva immessa all'interno del dominio dal lato posto a quota maggiore, per cui raggiungeva con maggior difficoltà il canale orizzontale.

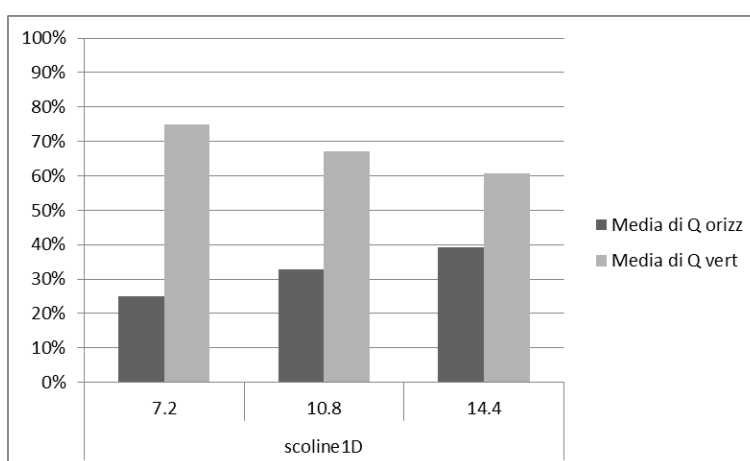


Figura 3.30 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.18 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
scoline1D	32%	68%
7.2	25%	75%
10.8	33%	67%
14.4	39%	61%

Per quanto riguarda l'area di dominio allagata, si osserva che mediamente il valore è simile a quello ottenuto nella prima simulazione, con la differenza che all'aumentare dell'intensità di precipitazione si ha un aumento dell'area allagata minore rispetto all'aumento che si aveva nella prima simulazione aumentando la portata in ingresso. Questo può essere

dovuto al fatto che la precipitazione agisce direttamente su tutto il dominio, per cui, anche con valori di intensità bassi, si ottiene un valore percentuale di area allagata relativamente elevato, e di conseguenza, aumentando l'intensità questo valore non aumenta di molto.

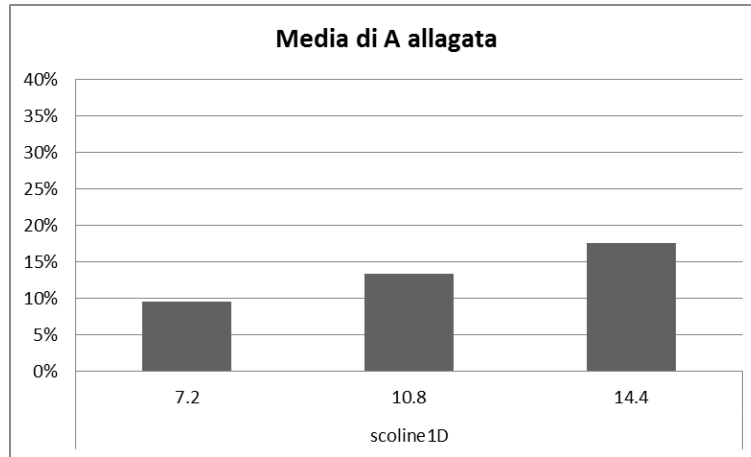


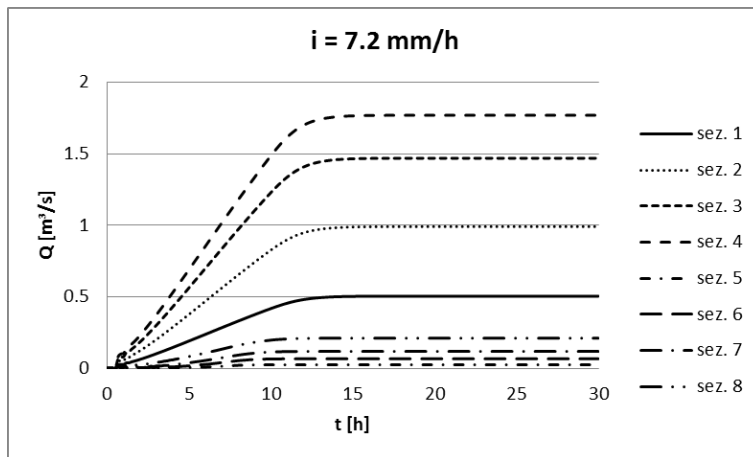
Figura 3.31 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.19 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite canali 1D, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Media di A allagata	
scoline1D	13%
7.2	10%
10.8	13%
14.4	18%

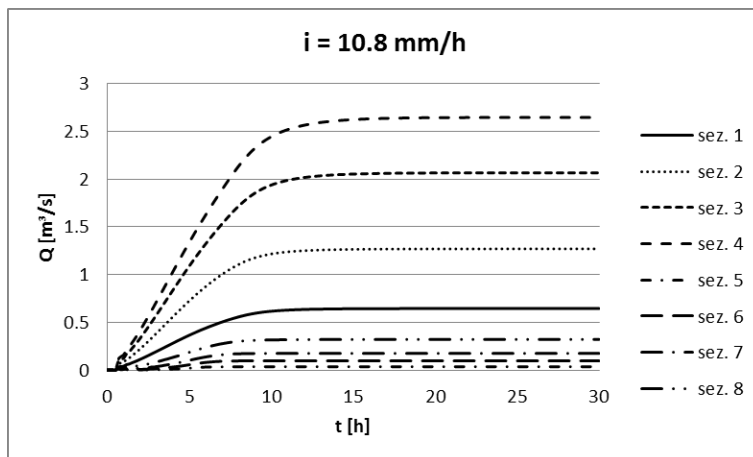
3.3.2. Simulazione con resistenza isotropa del terreno

Come visto nella prima simulazione, in questo caso, essendo la resistenza del terreno isotropa, la presenza delle scoline di fatto non viene considerata: l'acqua si distribuisce analogamente in entrambe le direzioni principali e non trova le facili vie di sfogo verso i canali collettori normalmente offerte dalle scoline, comportando un maggiore allagamento del terreno.



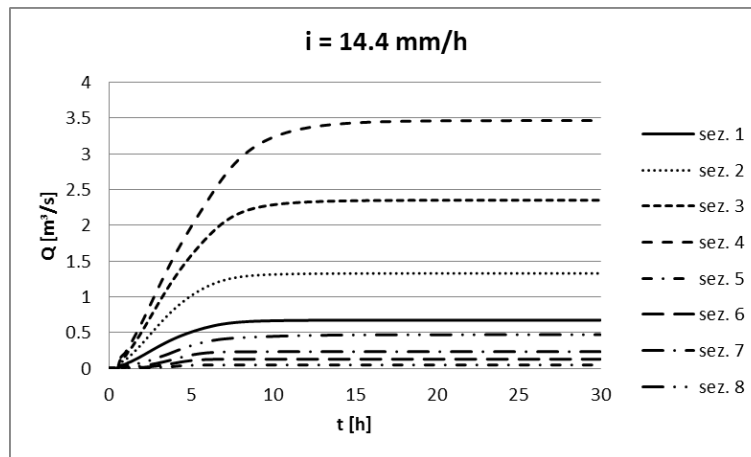
Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.50	0.99	1.47	1.77	0.02	0.07	0.12	0.21

Q canale orizzontale	89%
Q canale verticale	11%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.64	1.27	2.06	2.64	0.04	0.10	0.17	0.32

Q canale orizzontale	89%
Q canale verticale	11%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.67	1.33	2.35	3.46	0.05	0.13	0.23	0.47

Q canale orizzontale	88%
Q canale verticale	12%

In questa situazione si osserva che la maggior parte dell'acqua defluisce attraverso il canale collettore orizzontale, e che questo valore rimane percentualmente costante all'aumentare dell'intensità di precipitazione.

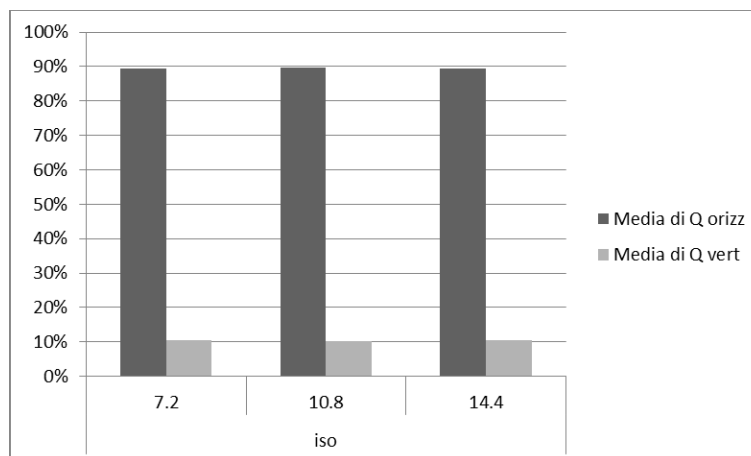


Figura 3.32 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Questo è dovuto al fatto che, come detto nel caso precedente, una parte della precipitazione cade direttamente sul canale orizzontale, o nelle sue vicinanze, fin dal primo istante, e inoltre, come detto al Paragrafo 3.2.2, al fatto che il terreno offre la medesima resistenza in entrambe le direzioni principali, per cui l'acqua non ha vie preferenziali di deflusso ma scorre analogamente su tutto il dominio.

Tabella 3.20 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
iso	90%	10%
7.2	90%	11%
10.8	90%	10%
14.4	90%	11%

Quanto detto in precedenza si osserva anche analizzando l'area di dominio allagata, la quale assume valori maggiori rispetto al caso in cui si rappresentano le scoline con i canali 1D, ma pressoché analoghi a quelli ottenuti con la prima simulazione.

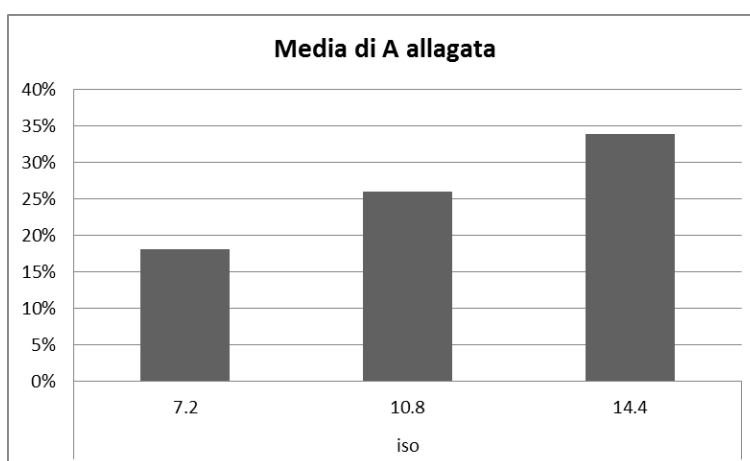


Figura 3.33 - Area di dominio allagata nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

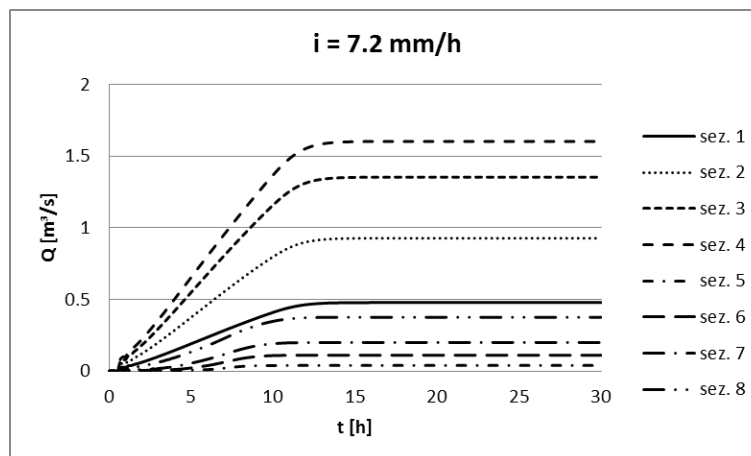
Tabella 3.21 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Media di A allagata	
iso	26%
7.2	18%
10.8	26%
14.4	34%

3.3.3. Simulazione con resistenza anisotropa del terreno

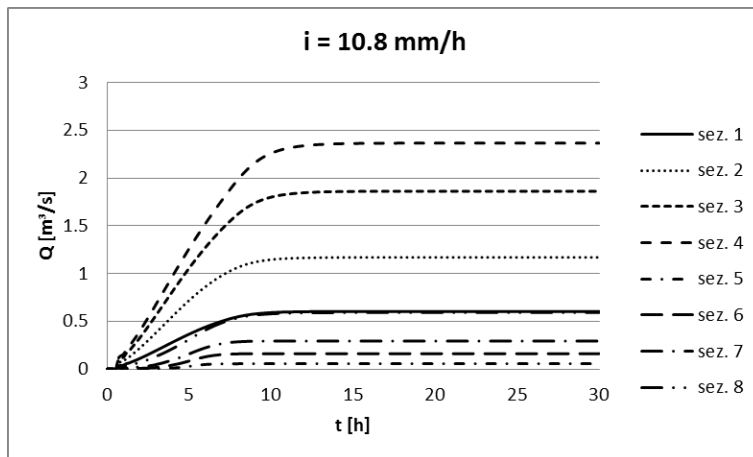
Per questa simulazione è stata effettuata un'analisi di sensibilità riguardo al coefficiente di scabrezza secondo Strickler in direzione orizzontale, in modo da osservare con quale valore di k_s longitudinale i risultati ottenuti ipotizzando la resistenza anisotropa del terreno si avvicinano maggiormente a quelli ottenuti rappresentando le scoline con i canali 1D. I valori considerati sono pari a 30, 75 e 150 $m^{1/3}/s$. In direzione trasversale invece il valore del k_s viene sempre preso pari a 15 $m^{1/3}/s$.

3.3.3.1. Simulazione con k_s pari a 30 $m^{1/3}/s$



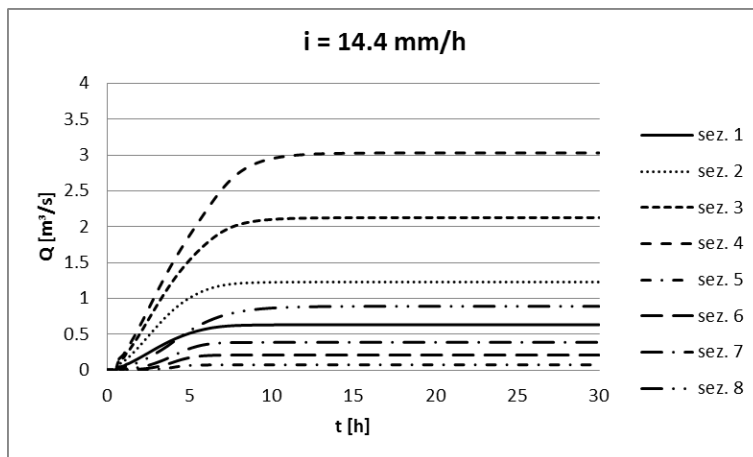
Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.48	0.93	1.35	1.60	0.04	0.11	0.20	0.38

Q canale orizzontale	81%
Q canale verticale	19%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.60	1.17	1.86	2.36	0.06	0.16	0.29	0.59

Q canale orizzontale	80%
Q canale verticale	20%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.63	1.23	2.13	3.03	0.07	0.21	0.39	0.89

Q canale orizzontale	77%
Q canale verticale	23%

Si osserva che con un basso valore del coefficiente di scabrezza longitudinale, la ripartizione della portata tra i due canali collettori è molto simile a quella ottenuta con la resistenza isotropa del terreno. Questo è dovuto a quanto detto riguardo la precipitazione nei

due precedenti casi, dato che nella prima simulazione si osservava una grande differenza tra il caso con resistenza isotropa del terreno e quello con resistenza anisotropa con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

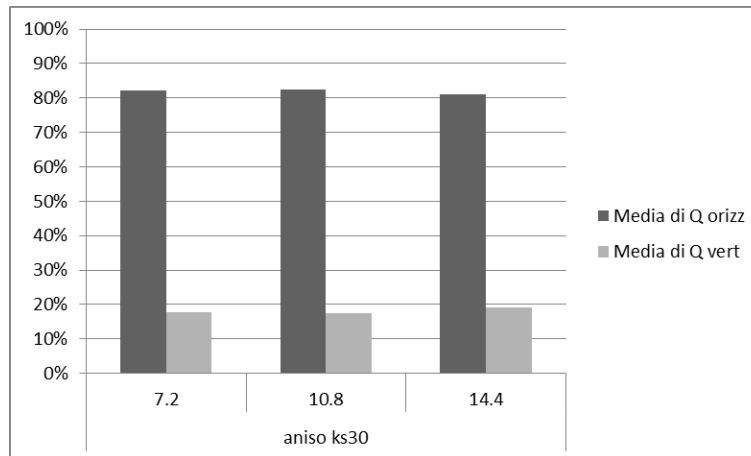


Figura 3.34 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.22 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks30	82%	18%
7.2	82%	18%
10.8	83%	18%
14.4	81%	19%

Per quanto riguarda l'area di dominio allagata, si osserva che, rispetto alla prima simulazione, il valore medio è aumentato, anche se si evidenzia una minore varianza rispetto al valor medio dei valori riferiti alle diverse intensità di precipitazione.

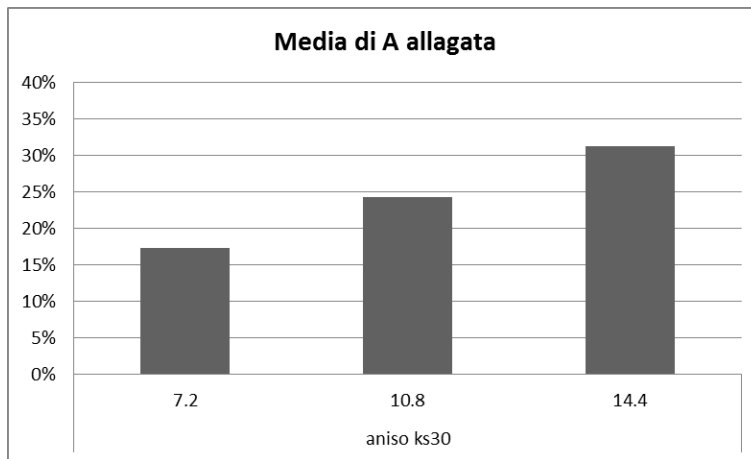
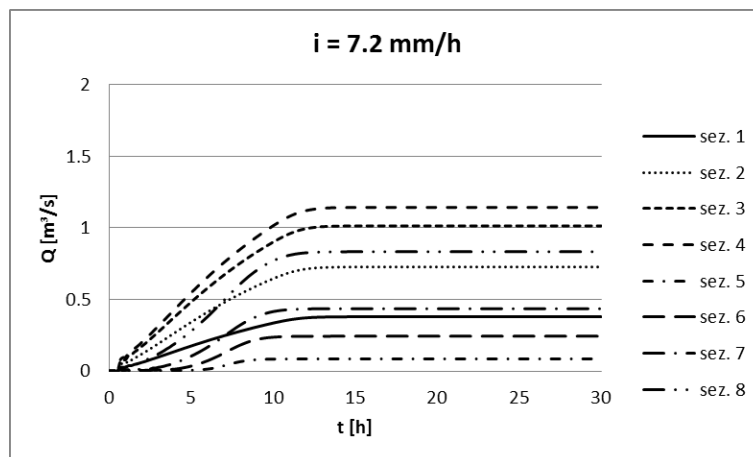


Figura 3.35 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.23 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

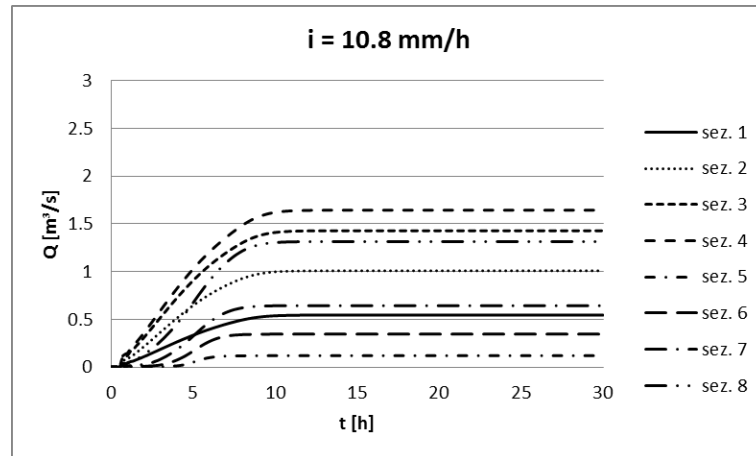
Media di A allagata	
aniso ks30	24%
7.2	17%
10.8	24%
14.4	31%

3.3.3.2. Simulazione con k_s pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



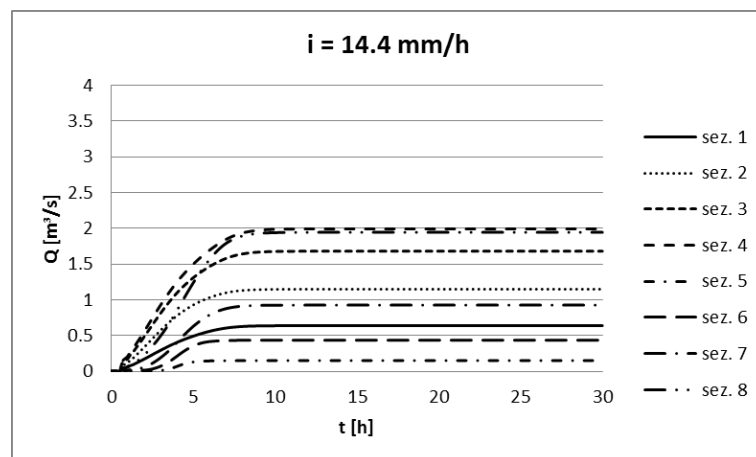
Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.38	0.73	1.01	1.14	0.09	0.24	0.44	0.83

Q canale orizzontale	58%
Q canale verticale	42%



Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.54	1.01	1.43	1.64	0.12	0.35	0.64	1.31

Q canale orizzontale	56%
Q canale verticale	44%



Q [m ³ /s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.64	1.15	1.68	1.99	0.15	0.44	0.93	1.94

Q canale orizzontale	51%
Q canale verticale	49%

Aumentando il valore del coefficiente di scabrezza longitudinale diminuisce la percentuale d'acqua che defluisce attraverso il canale collettore orizzontale, come spiegato anche nella prima simulazione. Rispetto alla situazione in cui veniva introdotta una portata dal lato posto a quota maggiore, in cui $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ veniva preso come valore di riferimento per k_s longitudinale, in questa simulazione tale valore offre risultati molto discordanti da quelli ottenuti rappresentando le scoline tramite gli elementi monodimensionali.

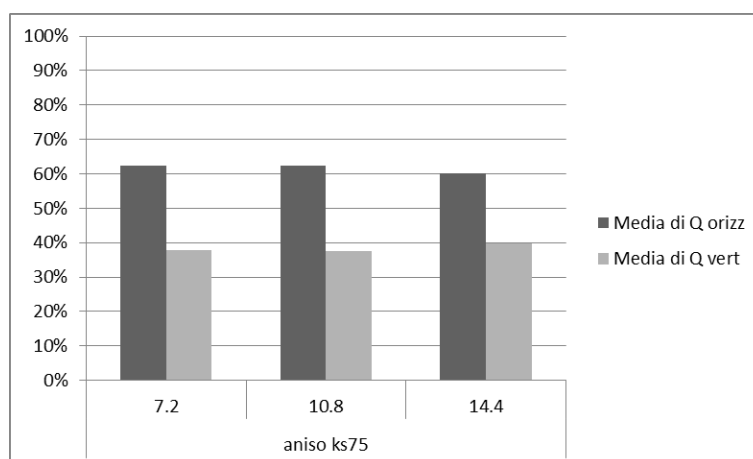


Figura 3.36 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.24 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks75	62%	38%
7.2	62%	38%
10.8	63%	38%
14.4	60%	40%

Questa differenza di valori si osserva anche analizzando la percentuale di area di dominio allagata, che risulta maggiore rispetto a quella riscontrata con gli elementi monodimensionali, e maggiore anche di quella ottenuta, nelle medesime condizioni, durante la prima simulazione.

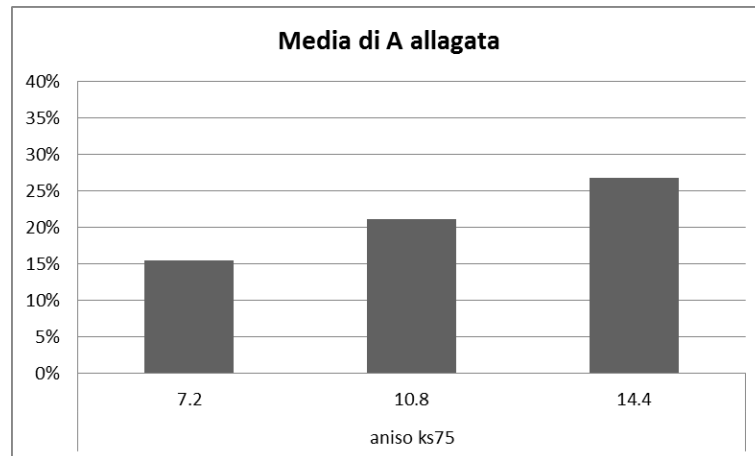
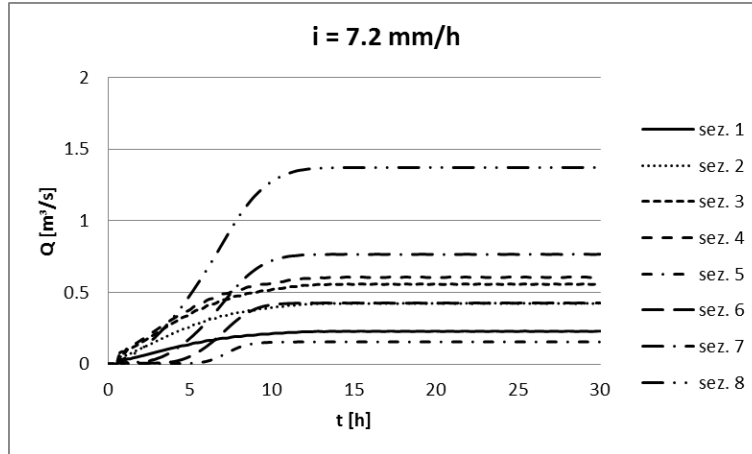


Figura 3.37 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.25 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

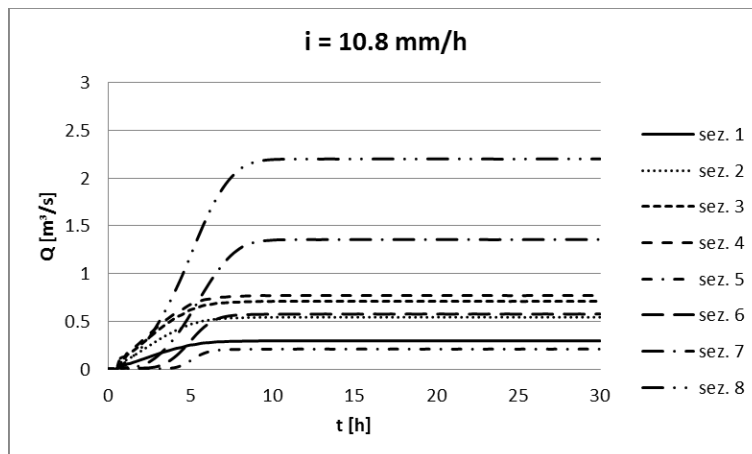
Media di A allagata	
aniso ks75	21%
7.2	16%
10.8	21%
14.4	27%

3.3.3.3. Simulazione con k_s pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



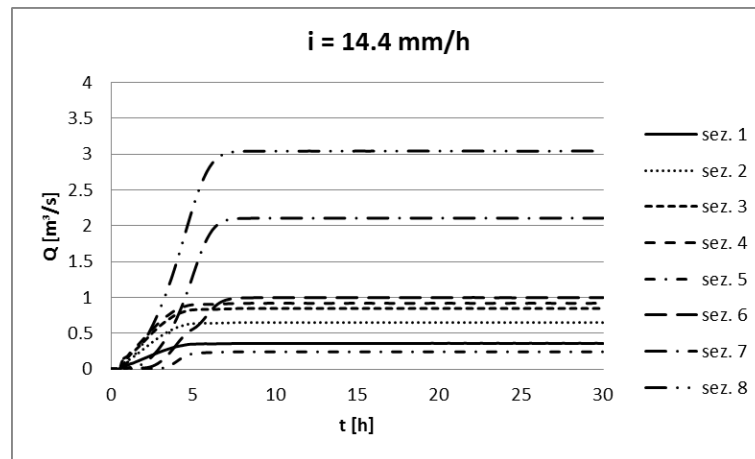
Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.23	0.43	0.56	0.61	0.15	0.43	0.77	1.37

Q canale orizzontale	31%
Q canale verticale	69%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.30	0.54	0.71	0.77	0.21	0.58	1.36	2.20

Q canale orizzontale	26%
Q canale verticale	74%



Q [m³/s] a t=30 h							
sez. 1	sez. 2	sez. 3	sez. 4	sez. 5	sez. 6	sez. 7	sez. 8
0.36	0.65	0.85	0.92	0.24	1.00	2.11	3.04

Q canale orizzontale	23%
Q canale verticale	77%

Utilizzando un valore molto elevato del coefficiente di scabrezza longitudinale si ottengono risultati relativamente simili a quelli ottenuti rappresentando le scoline tramite gli elementi monodimensionali.

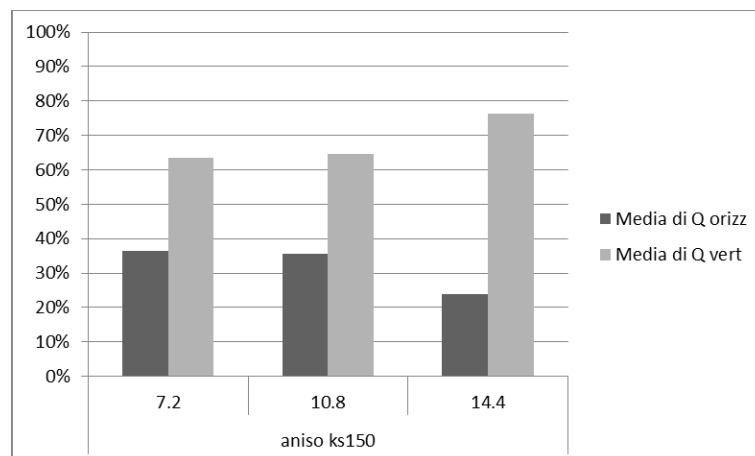


Figura 3.38 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Si osserva come mediamente il valore percentuale della portata suddivisa nei due canali collettori sia analogo, ma a differenza della prima situazione, in cui all'aumentare dell'intensità di precipitazione aumenta la percentuale d'acqua defluita attraverso il canale collettore orizzontale, in questa situazione si ha l'effetto opposto. Questo perché, aumentando il valore di k_s longitudinale, l'acqua trova vie preferenziali di deflusso orizzontali, scaricandosi all'interno del canale collettore verticale.

Tabella 3.26 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks150	32%	68%
7.2	37%	64%
10.8	36%	65%
14.4	24%	76%

La percentuale di area allagata del dominio diminuisce aumentando il valore del coefficiente di scabrezza e si avvicina a quella ottenuta rappresentando le scoline tramite gli elementi monodimensionali, ma si ha comunque una certa discordanza di valori.

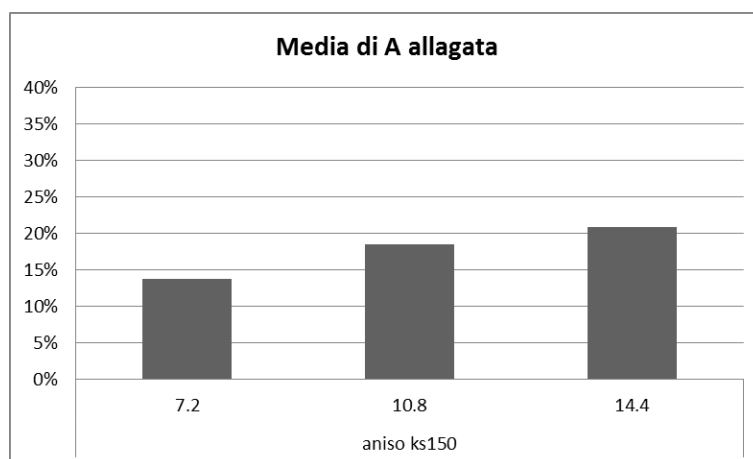


Figura 3.39 - Area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.27 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nel caso in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Media di A allagata	
aniso ks150	18%
7.2	14%
10.8	18%
14.4	21%

3.3.4. Confronto

Confrontando tra loro i risultati ottenuti utilizzando diversi valori del coefficiente di scabrezza longitudinale, si osserva che quelli che più si avvicinano a quelli ottenuti rappresentando le scoline tramite gli elementi monodimensionali sono quelli ricavati utilizzando k_s pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

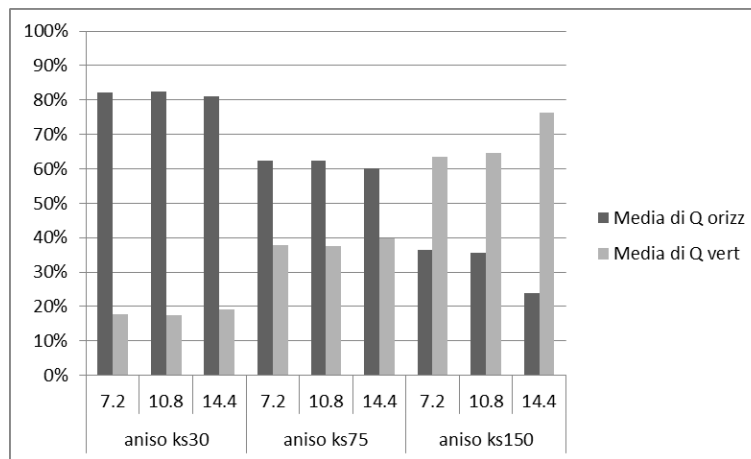


Figura 3.40 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nei diversi casi in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.28 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nei diversi casi in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
aniso ks30	82%	18%
7.2	82%	18%
10.8	83%	18%
14.4	81%	19%
aniso ks75	62%	38%
7.2	62%	38%
10.8	63%	38%
14.4	60%	40%
aniso ks150	32%	68%
7.2	37%	64%
10.8	36%	65%
14.4	24%	76%

Al crescere del valore del k_s longitudinale si ha una diminuzione dell'area di dominio allagata, e i risultati si avvicinano a quelli ottenuti rappresentando le scoline tramite i canali monodimensionali.

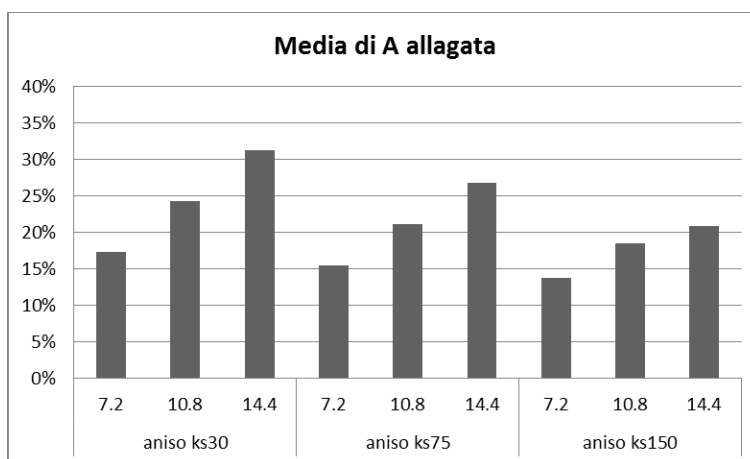


Figura 3.41 - Area di dominio allagata nei diversi casi in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.29 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nei diversi casi in cui le scoline sono rappresentate tramite la resistenza anisotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Media di A allagata	
aniso ks30	24%
7.2	17%
10.8	24%
14.4	31%
aniso ks75	21%
7.2	16%
10.8	21%
14.4	27%
aniso ks150	18%
7.2	14%
10.8	18%
14.4	21%

Mettendo a confronto questi risultati con quelli ottenuti considerando la resistenza isotropa del terreno, si osservano importanti differenze, mentre sono simili a quelli ottenuti rappresentando le scoline tramite i canali 1D. Questa similitudine si osserva analizzando il valor medio percentuale della ripartizione della portata nei due canali collettori, mentre si ha una grande differenza riguardo l'andamento dei valori riferiti alle singole intensità di precipitazione, in quanto, come detto al Paragrafo 3.3.3.3, all'aumentare di tale parametro aumenta la quantità d'acqua che defluisce all'interno del canale collettore orizzontale nel caso in cui vengono rappresentate le scoline tramite i canali 1D, mentre diminuisce nel caso in cui vengono rappresentate mediante la resistenza anisotropa del terreno.

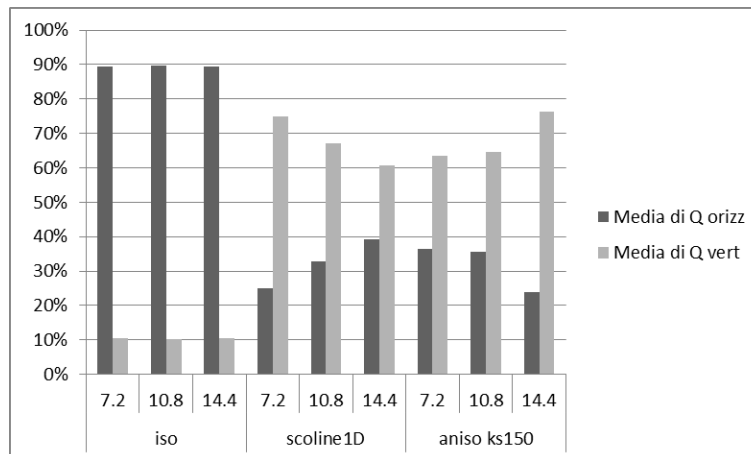


Figura 3.42 - Ripartizione della portata all'interno dei due canali collettori nei tre casi principali, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.30 - Ripartizione della portata, in percentuale, all'interno dei due canali collettori nei tre casi principali, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

	Media di Q orizz	Media di Q vert
iso	90%	10%
7.2	90%	11%
10.8	90%	10%
14.4	90%	11%
scoline1D	32%	68%
7.2	25%	75%
10.8	33%	67%
14.4	39%	61%
aniso ks150	32%	68%
7.2	37%	64%
10.8	36%	65%
14.4	24%	76%

Per quanto riguarda l'area di dominio allagata si osserva che, facendo riferimento alla resistenza anisotropa del terreno con k_s longitudinale pari a $150 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, si ottengono valori molto simili a quelli ottenuti rappresentando le scoline tramite gli elementi monodimensionali, mentre sono molto differenti da quelli ottenuti facendo riferimento alla resistenza isotropa del terreno.

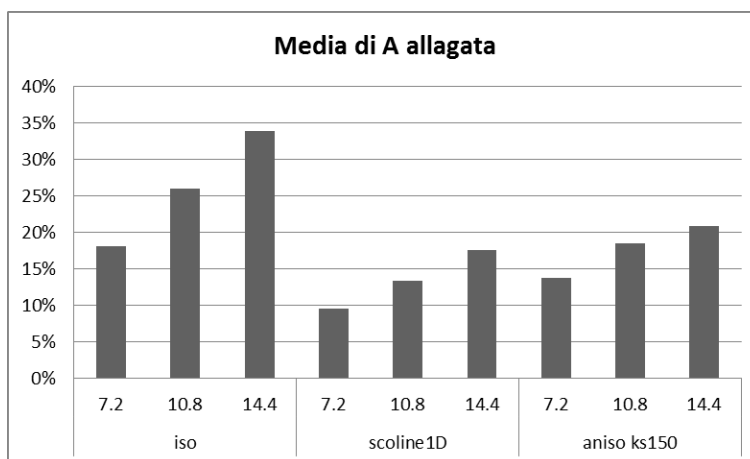


Figura 3.43 - Area di dominio allagata nei tre casi principali, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Tabella 3.31 - Valori percentuali dell'area di dominio allagata nei tre casi principali, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 7.2, 10.8 e 14.4 mm/h

Media di A allagata	
iso	26%
7.2	18%
10.8	26%
14.4	34%
scoline1D	13%
7.2	10%
10.8	13%
14.4	18%
aniso ks150	18%
7.2	14%
10.8	18%
14.4	21%

Anche in questo caso si riporta solamente l'immagine relativa al massimo tirante d'acqua presente sul dominio nel caso in cui non si considerano le scoline, ovvero introducendo la resistenza isotropa del terreno, in seguito ad un evento di precipitazione efficace di intensità pari a 14.4 mm/h con il livello iniziale pari a -0.2 m. Le immagini relative agli altri due casi non vengono riportate in quanto non sono presenti aree con tirante medio maggiore di zero.

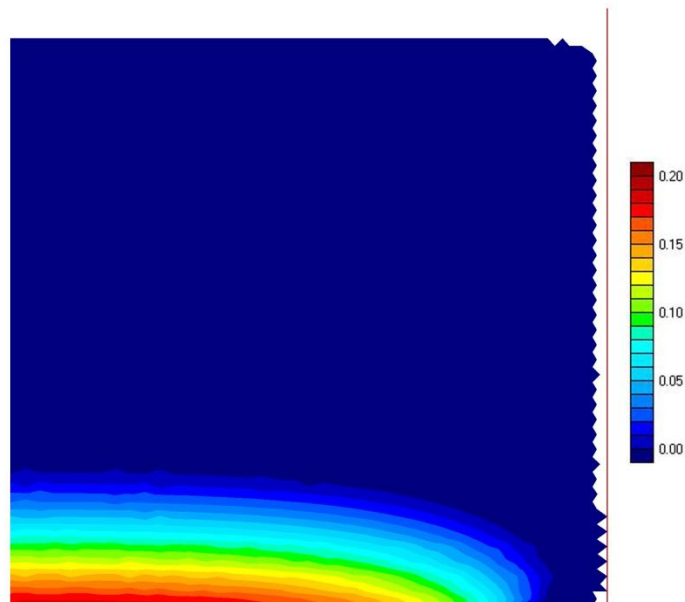


Figura 3.44 - Massimo tirante d'acqua sul dominio nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, in seguito a una precipitazione efficace di intensità pari a 14.4 mm/h con il livello iniziale pari a -0.2 m

4. Applicazione ad un caso reale: Scardovari (RO)

Come illustrato nel capitolo precedente, il modello è stato applicato a casi schematici per verificare se il comportamento idraulico delle scoline può essere riprodotto inglobandole all'interno del modello di sottogriglia, introducendo l'ipotesi di anisotropia degli sforzi al fondo. Si procede ora analizzando una situazione reale, nella quale saranno confrontati i risultati ottenuti rappresentando le scoline tramite il modello di sottogriglia, con quelli ottenuti considerando solo la presenza dei rami maggiori della rete di bonifica, senza tenere conto delle scoline, ovvero considerando la resistenza isotropa del terreno. In questo modo è possibile ottenere alcune indicazioni circa l'utilità pratica dell'introduzione dell'anisotropia degli sforzi al fondo all'interno del modello. A tal proposito è stata presa in considerazione una zona agricola nelle vicinanze del paese di Scardovari, in provincia di Rovigo.

Come nelle applicazioni schematiche precedenti, viene analizzato il deflusso dell'acqua sul terreno in seguito ad un evento di precipitazione o all'immissione puntuale di una portata, derivante ad esempio da un'esondazione di un canale esterno al dominio. Schematizzando le scoline mediante il modello di sottogriglia, ipotizzando cioè l'anisotropia degli sforzi al fondo, il valore del coefficiente di scabrezza k_s in direzione verticale (direzione prevalente delle scoline) viene preso pari a $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ovvero pari al valore che, nelle situazioni schematiche analizzate in precedenza, garantiva un comportamento idraulico delle scoline molto simile a quello ottenuto rappresentandole tramite gli elementi monodimensionali.



Figura 4.1 - Immagine aerea della zona di studio nelle vicinanze dell'abitato di Scardovari (RO)

All'interno della porzione di dominio considerata, viene compresa anche la rete di canali collettori, di dimensioni maggiori rispetto alle scoline, che vengono rappresentati mediante elementi monodimensionali, raffigurati in colore fucsia nella Figura 4.2, che riporta anche le quote del fondo delle maglie del dominio, ottenute a partire da rilievi Lidar ad alta risoluzione.

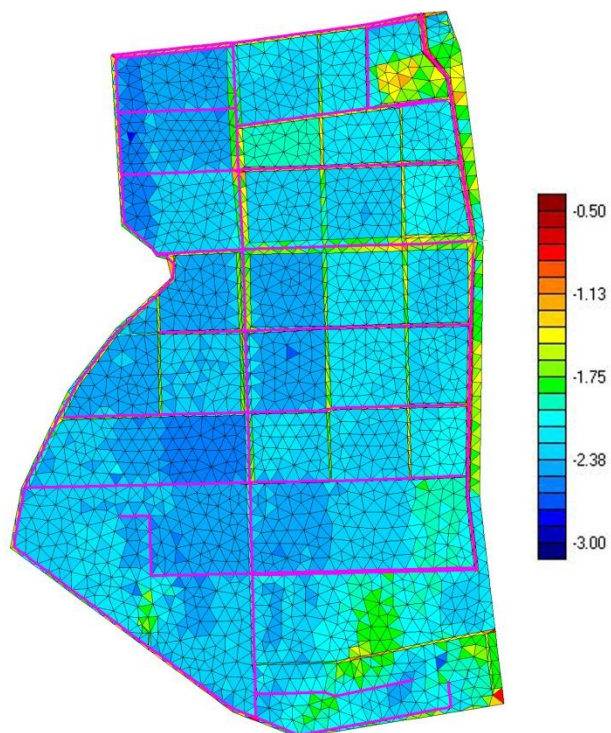


Figura 4.2 - File .geo della simulazione con rappresentazione della quota del fondo delle maglie

Per tutte e tre le simulazioni effettuate, la condizione iniziale di moto stazionario è stata ottenuta imponendo una precipitazione efficace di intensità pari a 0.1 mm/h.

Le successive simulazioni, riguardanti un evento di precipitazione o l'immissione puntuale di una portata d'acqua sul dominio, partiranno quindi dalle condizioni ottenute all'istante finale di questa prima simulazione, per cui all'interno del file *.sim* deve essere segnalata la lettura da un file *.bup* di restart.

```
***** CONDIZIONI INIZIALI *****
-3.5      livello iniziale
0         eventuale correzione livelli
1         eventuale lettura da restart
perm_int0.1.bup  nome file restart
```

Figura 4.3 - Condizioni iniziali nel file *.sim*, in cui si segnala la lettura da un file di restart

La prima simulazione si pone l'obiettivo di analizzare l'andamento dell'idrogramma nella sezione di uscita del bacino (sezione 3 di Figura 4.4): per far questo si considera un evento di precipitazione omogenea di intensità pari a 5 mm/h e della durata di un'ora, imponendo un livello costante nel nodo finale del bacino.

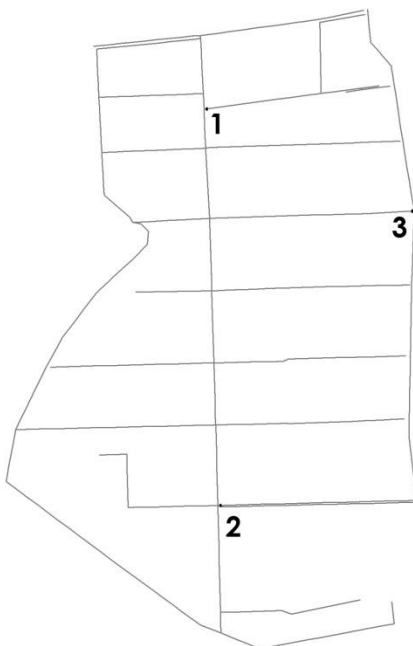


Figura 4.4 - Sezioni di riferimento in cui viene misurata la portata

Nella seconda simulazione si vuole analizzare la ripartizione della portata lungo i canali della rete di raccolta (sezioni 1 e 2 di Figura 4.4), e l'eventuale allagamento del dominio, in seguito ad un evento di precipitazione omogenea sull'area di studio, considerando una precipitazione efficace di intensità pari a 5 mm/h per una durata totale di 5 ore.

La terza simulazione invece considera l'immissione puntuale di una portata d'acqua da monte, pari a 40 m³/s per una durata di 10 ore, possibile conseguenza dell'esondazione di un canale esterno al dominio, in modo da analizzare il conseguente fenomeno dell'allagamento.

4.1. Considerazioni sulla risposta caratteristica del bacino

Come detto in precedenza, questa simulazione si pone l'obiettivo di analizzare le differenze dell'idrogramma nella sezione di uscita del bacino ottenuto considerando le scoline come parte del modello di sottogriglia, quindi introducendo gli sforzi anisotropi al fondo, e quello ottenuto ipotizzando la resistenza isotropa del terreno. Per far questo si considera un evento di precipitazione omogenea di intensità pari a 5 mm/h e della durata di un'ora, imponendo un livello costante nel nodo finale del bacino.

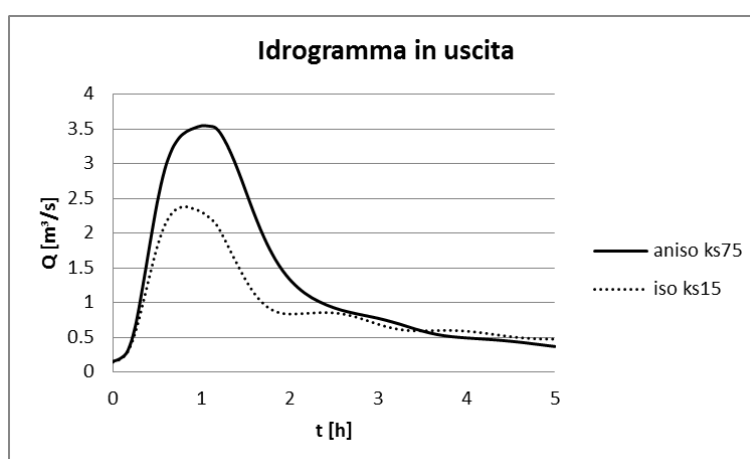


Figura 4.5 - Idrogramma nella sezione di uscita del bacino ipotizzando la resistenza del terreno anisotropa e isotropa, in seguito ad una precipitazione efficace di intensità pari a 5 mm/h e della durata di un'ora

Analizzando la Figura 4.5, si osserva che considerando l'anisotropia degli sforzi al fondo, il picco dell'idrogramma assume un valore maggiore di portata al picco (circa il 50% in più) rispetto al caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno, e inoltre si verifica per un tempo maggiore. Questo è dovuto al fatto che l'acqua, nel caso di resistenza anisotropa degli sforzi al fondo, incontra vie preferenziali di flusso in direzione verticale (direzione delle scoline), per cui la portata è maggiore nella sezione di uscita del bacino rispetto al caso di resistenza isotropa del terreno, con la quale l'acqua defluisce analogamente in tutte le direzioni.

Una notevole differenza tra i due casi analizzati si osserva anche per quanto riguarda il volume scaricato dal bacino. Considerando la resistenza isotropa del terreno tale volume è infatti minore, dato che una quantità maggiore d'acqua rimane immagazzinata nel terreno, come si osserva nella Figura 4.6 che rappresenta il livello dell'acqua sull'area di studio all'istante finale della simulazione.

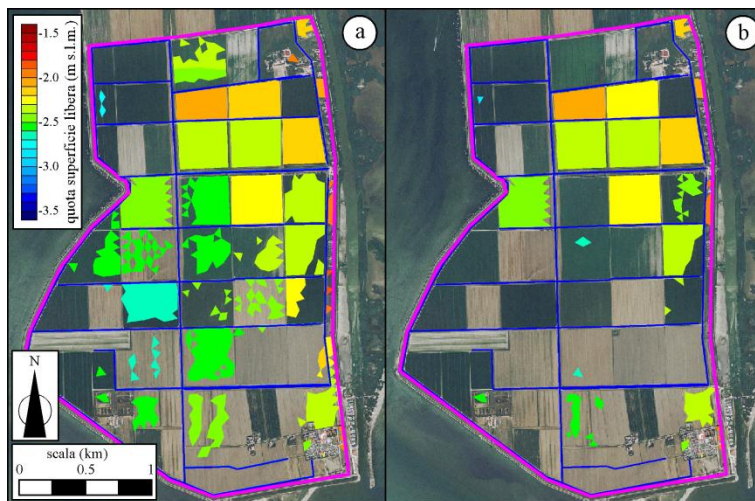


Figura 4.6 - Livello all'istante finale della simulazione in seguito ad una precipitazione efficace di intensità pari a 5 mm/h e della durata di un'ora, ipotizzando resistenza isotropa (a) del terreno e resistenza anisotropa (b)

4.2. Considerazioni sulla ripartizione delle portate nella rete di drenaggio

Questa simulazione vuole analizzare la ripartizione della portata lungo i canali della rete di raccolta (sezioni 1 e 2 di Figura 4.4), e l'eventuale allagamento del dominio, in seguito ad un evento di precipitazione omogenea sull'area di studio, considerando una precipitazione efficace di intensità pari a 5 mm/h per una durata totale di 5 ore.

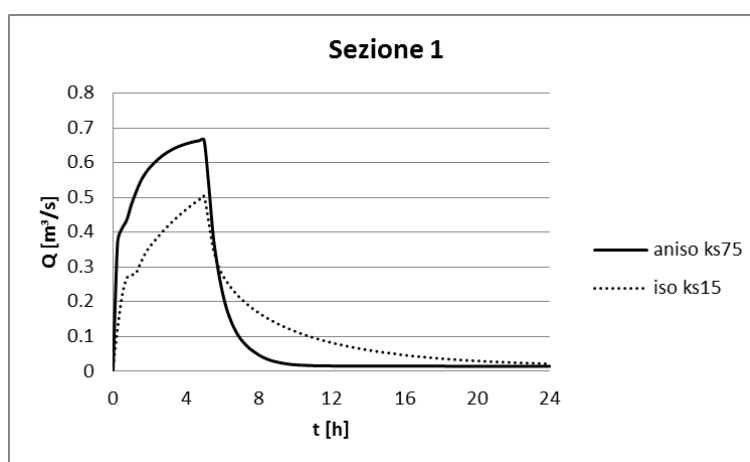


Figura 4.7 - Andamento della portata nella sezione 1 di Figura 4.4 ipotizzando la resistenza del terreno anisotropa e isotropa, in seguito ad una precipitazione omogenea di intensità pari a 5 mm/h e della durata di 5 ore

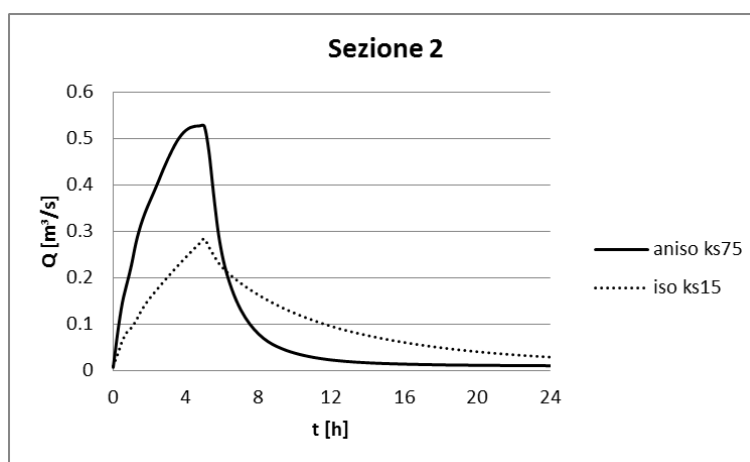


Figura 4.8 - Andamento della portata nella sezione 2 di Figura 4.4 ipotizzando la resistenza del terreno anisotropa e isotropa, in seguito ad una precipitazione omogenea di intensità pari a 5 mm/h e della durata di 5 ore

Analizzando i grafici sopra riportati, che si riferiscono alle sezioni 1 e 2 di Figura 4.4, si osserva che, ipotizzando l'anisotropia degli sforzi al fondo, defluisce, nelle due sezioni analizzate, una portata maggiore rispetto al caso in cui si ipotizza la resistenza isotropa del terreno. Questo è dovuto a quanto detto in precedenza, ovvero al fatto che nel primo caso l'acqua segue vie preferenziali di flusso (le scoline) in direzione verticale, mentre nel secondo caso, trovando la medesima resistenza del terreno lungo entrambe le direzioni principali, l'acqua segue maggiormente la pendenza del terreno. Le differenze di portata che si sono riscontrate possono essere localmente elevate e, di conseguenza, comportare ripercussioni in fase di dimensionamento e verifica dei rami minori delle reti di drenaggio.

Osservando la Figura 4.9 si evidenzia che, nel caso in cui si considera la resistenza isotropa del terreno (riquadro a), il modello fornisce valori del tirante d'acqua maggiori, e di conseguenza un maggior allagamento, all'interno del dominio, rispetto al caso in cui si consideri l'anisotropia (riquadro b).



Figura 4.9 - Massimo tirante d'acqua sul dominio in seguito ad una precipitazione efficace di intensità pari a 5 mm/h per una durata di 5 ore, ipotizzando resistenza isotropa (a) del terreno e resistenza anisotropa (b)

4.3. Considerazioni su fenomeni di allagamento di maggiore entità

In questa simulazione si considera l'immissione puntuale di una portata d'acqua da monte (zona evidenziata dalla freccia nera in Figura 4.10), possibile conseguenza dell'esonazione di un canale esterno al dominio, pari a $40 \text{ m}^3/\text{s}$ per una durata di 10 ore. Il parametro fondamentale che si analizza è il tirante massimo riscontrato sul dominio, dal quale si determina l'allagamento del dominio stesso.

Con riferimento alla Figura 4.10, considerando la resistenza isotropa del terreno (riquadro a), l'acqua tende a seguire i modesti gradienti topografici. Ipotizzando invece la resistenza anisotropa (riquadro b) del terreno si ha un allagamento nella zona Nord-Ovest del dominio leggermente minore, mentre nella zona cerchiata in rosso si riscontrano tiranti decisamente maggiori: questo è dovuto al fatto che l'acqua scorre preferenzialmente in direzione verticale, per cui riesce a sormontare i rilevati che costeggiano i canali di dimensioni maggiori che scorrono trasversalmente rispetto alle scoline stesse, allagando maggiormente i campi presenti in quella zona. Nella zona Sud del dominio gli allagamenti sono invece molto simili nei due casi.



Figura 4.10 - Massimo tirante d'acqua sul dominio in seguito all'immissione di una portata di $40 \text{ m}^3/\text{s}$ per una durata di 10 ore dalla zona Nord-Est, considerando la resistenza del terreno isotropa (a) e anisotropa (b)

5. Conclusioni

Utilizzando il modello bidimensionale *2DEF* per lo studio della propagazione delle onde di piena, si è voluto verificare se i canali di dimensioni minori, come le scoline, possono essere inglobati all'interno del modello di sottogriglia, evitando così di dover generare schematizzazioni del territorio esageratamente dettagliate. Per far questo è stata introdotta l'ipotesi di anisotropia degli sforzi al fondo, in modo da assegnare un valore differente del coefficiente di resistenza in una direzione rispetto all'altra, consentendo all'acqua di trovare una via preferenziale di flusso lungo la direzione in cui il terreno offre minore resistenza.

Quest'ipotesi è stata applicata ad un caso schematico, un'area agricola di forma quadrata con lato pari a 1000 m, delimitata da due canali collettori, uno verticale e uno orizzontale, posti rispettivamente all'estremo destro e all'estremo inferiore del dominio, nella sezione finale dei quali viene misurata la portata. Forzando il modello mediante l'immissione di portata da un'estremità del dominio e, successivamente, con un evento di precipitazione omogenea sull'intero dominio, sono stati analizzati i risultati ottenuti con diverse schematizzazioni delle scoline: nel caso di riferimento le scoline sono state schematizzate esplicitamente mediante l'uso di canali 1D, in un secondo caso la presenza delle scoline non è stata considerata, mentre nel terzo caso si è cercato di riprodurre la funzione svolta dalle scoline mediante un modello di sottogriglia, mediante la formulazione anisotropa delle resistenze al fondo. Considerando quest'ultimo scenario, dopo un'analisi di sensibilità, si è arrivati a determinare il valore di k_s in direzione longitudinale (ovvero lungo la direzione delle scoline) che permette di ottenere risultati molto simili a quelli che si ottengono rappresentandole tramite gli elementi monodimensionali, sia per quanto riguarda la ripartizione della portata all'interno dei canali collettori, sia per quanto riguarda l'allagamento complessivo del dominio. Ipotizzando invece la resistenza isotropa del terreno si ottengono risultati molto differenti, con un notevole aumento sia della portata defluita lungo il canale collettore orizzontale, sia della percentuale di area allagata.

Infine il modello è stato applicato ad un caso reale, prendendo in considerazione una zona agricola nelle vicinanze dell'abitato di Scardovari (RO), in modo da osservare le differenze tra i risultati ottenuti introducendo l'ipotesi di resistenza anisotropa al fondo rispetto al caso isotropa. Utilizzando valori dei coefficienti di resistenza ottenuti in seguito all'analisi di sensibilità effettuata per il caso schematico, si è osservato come la schematizzazione delle scoline mediante il modello di sottogriglia comporti alcune rilevanti differenze rispetto al caso in cui si consideri solo la presenza dei rami maggiori della rete di bonifica. In particolare, è stato osservato un generale aumento della portata alla sezione di uscita del bacino, una diversa ripartizione della stessa lungo i canali della rete di raccolta, e alcune differenze nei fenomeni di allagamento. Infatti, considerando la presenza delle scoline mediante il modello di sottogriglia, l'acqua tende a raggiungere la rete di raccolta più velocemente e seguendo direzioni predefinite dall'orientamento delle scoline stesse, non generalmente coincidenti con la pendenza del terreno.

Bibliografia

Defina A, D'Alpaos L, Matticchio B. A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models. In: Molinaro P, Natale L, editors. Modelling flood propagation over initially dry areas. New York: American Society of Civil Engineers; 1994. p. 72–81.

D'Alpaos L, Defina A, Matticchio B. A coupled 2D and 1D finite element model for simulating tidal flow in the Venice channel network. In: Proceedings of the ninth international conference on finite elements in fluids, Venezia; 15–21 October 1995. p. 1397–406.

Defina A. Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resour Res*, 0043-1397 2000;36(11):3251–64. <http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900167>.

Defina A. Numerical experiments on bar growth. *Water Resour Res* 2003;39(4):ESG21–ESG212. <http://dx.doi.org/10.1029/2002WR001455>.

D'Alpaos L, Defina A. Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: a review of open issues and applications to the Venice lagoon. *Comput Geosci* 2007;33:476–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2006.07.009>.