سال بیست و هشتم، شمارهٔ دو، ۱۳۹۵

DOI: 10.22067/civil.v28i2.36669

نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی

مطالعة عددي آب شستگي جت ريز شي آزاد*

خسرو حسینی^(۱) حامد نوخاسته^(۲) حجت کرمی^(۳) سید امین سلامتیان^(۱)

چکیده بررسی پایادهٔ آبشستگی پاییندست جت ریزشی پیچیاده است و عوامل متعادد از جمله مشخصات جریان و رسوب و همچنین هندسهٔ مجرای عبور جریان بر آن تأثیرگذار است. در تحقیق حاضر، مللسازی علدی آبشستگی ناشی از جت ریزشی از یک نمونهٔ آزمایشگاهی، توسط نرم/فزار SSIIM2 صورت گرفته است. مقادار زبری، مال انتقال رسوب و مال آشفتگی با استفاده از آزمونهای ضریب تعیین و میانگین قادرمطلق خطا واسنجی گردیاده است. نتایج مللسازی عادی نشان داد که با افزایش عاد فرود جریان، عاد فرود مصالح و ارتفاع ریزش، عمق آبشستگی افزایش می بابد.

واژههای کلیدی آبشستگی، مدل عددی SSIIM، عدد فرود مصالح، جت ریزشی، ارتفاع ریزش.

Free Impinging Jets Scouring, Using Numerical Model

K. Hosseini H. Nokhasteh H. Karami S. A. Salamatian

Abstract Investigation on local scour phenomenon downstream of impinging jets is very complicated. Different parameters such as geometry of stream, characteristics of flow and sediments have great influences on the scour phenomenon. The present study is preceded to numerical modeling of scouring by impinging jet via SSIIM 2 model founded on a physical model tests. The numerical model is calibrated for roughness coefficient, turbulence model and the bed load sediment transport function by using the coefficient of determination and the mean absolute error. Effects of Froude number, densimeteric Froude number and drop height on scouring by impinging jet were investigated. The results indicate that the maximum scour depth increases by increasing Froude number; densimeteric Froude number and drop height.

Key Words Scouring, Numerical Modeling SSIIM, Densimetric Froude Number, Impinging Jet, Drop Height.

(٤) استادیار، گروه مهندسی عمران، مؤسسهٔ غیرانتفاعی آل طه، تهران.

hkarami@semnan.ac.ir

[★] تاریخ دریافت مقاله ۹۳/٤/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/٤/۱۰ میباشد.

⁽۱) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

⁽۲) دانش آموختهٔ مهندسی عمران- سازههای هیدرولیکی، دانشگاه سمنان.

⁽٣) نويسنده مسئول: استاديار، دانشكدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مطالعهٔ عددی آبشستگی جت ریزشی آزاد

ارائه شده توسط محققان مختلف برای پیش بینی حداکثر عمق آب شستگی ناشی از جت ریز شی آزاد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ روابط ارائهشده توسط محققان

محقق	رابطه
Martins [4]	$y_{s} + y_{t} = 0.14N - 0.73 \frac{y_{t}^{2}}{N} + 1.7y_{t}$ $N = 7(\frac{Q^{3}H^{1.5}}{d_{50}^{2}})^{0.5}$
Jaeger [5]	$y_s = 0.6q^{0.5}H^{0.25}(\frac{y_t}{d_{50}})^{0.333}$
Ghodsian et al. [6]	$\frac{\mathbf{y}_{s}}{\mathbf{y}_{t}} = \mathbf{a} (\frac{\mathbf{y}_{t}}{\mathbf{H}_{c}})^{b} (\mathbf{F}\mathbf{r}_{d50} \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{H}_{c}})^{c}$
محبوبی [۷]	$y_s = 0.526 q^{0.65} 4 H^{0.246} d_{50}^{-0.405}$

Q (m³/s) در این روابط (m) y_s (m) عمق آبشستگی، (m) در دبی جریان، (m²/s) وبی در واحد عرض، (m) (m) اختلاف ارتفاع عمق آب بالادست و پاییندست، (m) شعاع هیدرولیکی جت، (m) d₅₀ قطر متوسط ذرات بستر، (m/s) سرعت جت خروجی، (m) y_t عمق پایاب، (m) ارتفاع ریزش، که در آن Fr_{d50} عدد فرود مصالح و a, b, c ضرایب ثابت میباشند.

مرسیر و همکاران به بررسی عددی آب شستگی جت عمودی با استفاده از مدل ترکیبی اولری لاگرانژی و معادلات ناویر –استوکس آشفته و نرمافزار Ansys Fluent پرداختند، روش آنها هم بخش جامد و هم بخش مایع را درنظر گرفته بود که توسط رابط کاربر از یکدیگر جدا می شد. آنها عنوان کردند که مدل آشفتگی یکدیگر جدا می شد. آنها عنوان کردند که مدل آشفتگی مدل سازی فشار بهترین نتیجه را می دهد [8]. ون یان و همکاران آب شستگی جت صفحهای مستغرق را با استفاده از مدل های دوبعدی مدل سازی نمودند. در مطالعات آنها از مدل ٤-8 برای آشفتگی استفاده شده است. آنها نیروی اصطکاک بین ذرات، نیروی نشت خلل و فرج و نیروی گرانش را نیروهای مقاوم در برابر حرکت و تنش برشی محلی جریان را عامل محرک درنظر گرفتند [9]. مقدمه

جریان خروجی از مخزن سد دارای انرژی بسیار زیادی است. برخورد جت آب با بستر، آنرا دچار آبشستگی مینماید. با آگاهی از میزان تأثیر آبشستگی بر سازهها و محل وقوع آن، میتوان از وجود خرابی و مشکلات ناشی از آبشستگی جلوگیری نمود. یکی از سازههای تسکین جریان در پایاب سرریزها، حوضچههای استغراق میباشد. ابعاد حفرهٔ آبشستگی ناشی از جت ریزشی تابع پارامترهای متعددی میباشد که اطلاع کامل از ایان عوامل و نحوهٔ تأثیر آنها بر حفرهٔ آبشستگی، به طراحان در جانمایی حوضچه کمک زیادی نماید.

مواد و روش ها

استین و جولین در آزمایش های خود متوجه شدند که غلظت رسوب خروجي از حفرة أبشستكي بهوسيلة جت ريزشي وابسته به يتانسيل جداشدگي ذرات رسوب میباشد. در نزدیکی هسته، غلظت رسوب حداکثر است و با عمق کاهش مییابد و همچنین غلظت رسوبات با زمان کاهش می یابد [1]. آبیدا و تاون سند نشان دادند که طول حفرهٔ آب شستگی (Ls) مانند عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب (yt) کاهش می یابد. زمانی که عمق نسبی پایاب کم باشد (yt/H < 0.2) طول حفرة أبشستكي ضرورتاً مستقل از عمق پایاب می باشد، افزایش عمق پایاب اثر زیادی روی طول حفرۂ آبشستگی دارد بەطوری کے ہرقیدر عمق پایاب بیشتر میشود طول آبشستگی کاهش مىيابد [2]. وستريچ و كوباس نشان دادنـد كـه تـأثير ارتفاع ریزش بر آبشستگی بسیار متفاوت است. در ابتدای این پدیده، حجم آب شستگی با افزایش ارتفاع ریزش جت H افزایش می یابد. سپس با افزایش H حجم آبشستگی ثابت میماند و بعد از آن، افزایش H اثر معکوس دارد بهطوریکه با افزایش H حجم آبشستگی کاهش می یابد [3]. یکی از پارامترهای مورد توجه محققان در بررسی پدیده آب شستگی، عمق حداکثر آبشستگی بوده است. تعدادی از روابط

نشريهٔ مهندسي عمران فردوسي

سال بیست و هشتم، شمارهٔ دو، ۱۳۹۵

Archive of SID

11

نظر به این که اکثر مطالعات ارائه شده مبتنی بر داده های تجربی و آزمایشگاهی است، در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از نرمافزار SSIIM شرایط آزمایشگاهی آب شستگی جت ریزشی شبیه سازی گردد. در این راستا واسنجی ضریب زبری، مدل آشفتگی و معادلهٔ انتقال بار بستر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از واسنجی مدل عددی، تغییر شرایط جریان و مشخصات رسوب با ارزیابی پارامترهای ارتفاع ریزش، عدد فرود جریان و عدد فرود مصالح مطالعه گردید. با استفاده از نتایج این تحقیق می توان به ارزیابی جانمایی سازه ها و تمهیدات لازم برای مقابله

معرفی مدل عددی SSIIM

مدل SSIIM یک مدل سهبعدی هیدرودینامیکی و انتقال رسوب بر مبنای روش حجم محدود است که در دو نسخه توسط السن در سال ۱۹۹٤ معرفی شد. برای مدل کردن جریان در هندسههای پیچیده در SSIIM1 از شبکههای ساختاریافته و در SSIIM2 از شبکههای بدون ساختار استفاده شده است. در شبکههای ساختار یافتهٔ سهبعدی هر سلول در شبکه سه شاخص (z، v, x) دارد که مشخص کردن موقعیت شبکه را آسان میکند. در فایل اطلاعات ورودی موقعیت و سطوح دبی ورودی و خروجی دیوارهها مشخص می گردد. در شبکههای بدون ساختار هر سلول یک شاخص دارد که بهطور تصادفی ساخته میشود [10].

معادلات جريان

در نرمافزار SSIIM معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات پیوستگی (معادلهٔ ۱) و ناویر –استوکس (معادلهٔ ۲) میباشند. (۱) $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})$$
(7)

نشريهٔ مهندسي عمران فردوسي

در رابطهٔ (۲) عبارت اول سمت چپ ترم گذار (تغییرات زمانی) و عبارت بعدی ترم شتاب جابه جایی می باشد. اولین عبارت سمت راست در این رابطه، ترم فشار و بعدی ترم مربوط به تنش رینولدز است. برای ارزیابی عبارت اخیر به یک مدل آشفتگی نیاز می باشد.

مدل آشفتگی k-ɛ

در نرمافزار SSIIM2 مدل ع-k مدل پیش فرض برای
آشفتگی می باشد که به صورت رابطهٔ (۳) توسعه یافته
است.
$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \epsilon$$
(۳)

کـه در آن ضـریب σ_k برابـر بـا ۱ و v_T لزجـت گردابهای است که توسط رابطهٔ (٤) محاسبه مـیگـردد. مقدار P_k را می توان از رابطهٔ (۵) بهدست آورد.

$$v_{\rm T} = C_{\mu} \frac{K}{\epsilon^2}$$
 (2)

$$P_{k} = v_{T} \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \left(\frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right)$$
(\$)

در رابطهٔ (٤)، k انرژی جنبشی آشفته و ٤ بیانگر میزان اتلاف انرژی جنبشی است که از رابطهٔ (٦) تعیین میشود. ضریب C_{μ} برابر ۲۰۰۹ میباشد. $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_{i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} (\frac{v_{T}}{\sigma_{k}} \frac{\partial k}{\partial x_{j}}) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p_{k} + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^{2}}{k}$ (۶) (\mathcal{P}) ضرایب $\Gamma_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 2} - c_{\varepsilon 2}$ بهترتیب برابر با ۱/۱۶ و ۱/۹۲ میباشند.

معادلات انتقال رسوب

انتقال رسوب به دو صورت بار بستر و بار معلق انجام می شود. بار معلق را می توان به کمک معادلات پخش-انتقال با محاسبهٔ غلظت رسوب باتوجه به رابطهٔ (۷)

سال بیست و هشتم، شمارهٔ دو، ۱۳۹۵

مدل فیزیکی در آزمایشگاهی سلامتیان مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس و در یک فلوم به طول ۱۳ متر، طول مفید ۱۰ متر، عرض ۲/۰ متر و ارتفاع ۹/۰ منر انجام شده است. شکل (۱) نمای کلی فلوم را از بالا به صورت شماتیک نشان می دهد. آزمایش انجام شده دردبی (Q) ۱۰/۱۱ لیتر بر ثانیه و ارتفاع ریزش (H) برابر ۲۰٫۵ صورت گرفته است.. رسوبات به کار رفته در آزمایش، از جنس سیلیس دانه بندی شده، یکنواخت و با چگالی مخصوص ۲/۱۳ می باشد. هم چنین م50 به عنوان قطر مشخصهٔ ذرات و برابر ۱/۲۲ میلی متر درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که عمق پایاب در کلیهٔ آزمایش ها ثابت و برابر با ۲/۰ متر در نظر گرفته شده

مشخصات میدان حل

شبکهبندی مدل بهصورتی است که مخزن رسوب در طول دارای شبکه به نسبت x/y=0.219 (شکل ۲-الف) و در عمق برای ارتفاع ریزش ۲۰/۰ متر دارای نسبت x/z=0.323 (شکل ۲- ب) میباشد. بنابر این مدلی با تعداد سلول ۱۹×۲۵×۱۹۰ (i=191, j=26, k=17) ایجاد گردیده است.



شکل ۲ مش به کار رفته در شبکهٔ ۱۸×۲۵×۱۹۰

نشريهٔ مهندسی عمران فردوسی

تعيين نمود.

$$\frac{\partial \mathbf{c}}{\partial t} + \mathbf{u}_{i} \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{x}_{j}} + \mathbf{w} \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{j}} (\Gamma_{\mathrm{T}} \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{x}_{j}})$$
(V)

w سرعت سقوط ذرات و ۲_۲ ضریب پخش میباشد که توسط رابطهٔ (۸) محاسبه میشود:

$$\Gamma_{\rm T} = \frac{\nu_{\rm T}}{\rm Sc} \tag{A}$$

sc عدد اشمیت است و بـه صـورت پـیش.فـرض برابر با یـک درنظـر گرفتـه مـیشـود. vr نیـز لزجـت گردابهای جریان است. در مدل عددی SSIIM برای بار بستر، روابط انگلونـد-هانسن، انیشتن، وو، ایکرز-وایت وفـن رایـن تعریـف شدهاند.

واسنجي مدل عددي

در این بخش واسنجی مدل عددی SSIIM در خصوص انتخاب زبری، تعداد سلولها، مدل آشفتگی و معادلهٔ انتقال رسوب بار بستر با ارزیابی حداکثر عمق حفرهٔ آبشستگی ناشی از جت ریزشی توسط مدل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سلامتیان [11] و جنیان [12] بررسی گردیده است.



شكل ۳ آزمون R² براى زبرى بستر بەترتيب d50 وd90 d90

آزمون MAE	آزمون R ²	مدل آشفتگی	معادلة انتقال رسوب بستر	
•/•/٩	•////	k-ε		
•/•AA	•/٩•٩	Local k-ε	van Rijn [13]	
•/•٣٩	•/972	k-ε	Engebund/Hongon [14]	
•/•٣	•/927	Local k-ε	Engelund/Hansen [14]	
•/•9٣	٠/٩	k-ε	Einstein [15]	
•/•٣١	•/٩١	Local k-ε	Einstein [15]	
•/•07	•/٩٣٨	k-ε	Wn [16]	
•/•٤0	•/901	Local k-ε	wu [10]	

جدول ۲ نتایج آزمون R² و MAE

لازم به ذکر است که مدل فن راین برای جریانهایی با سرعت کم و عمق زیاد و مدل وو برای محاسبهٔ انتقال رسوب در خمها نتایج بهتری می دهد. همچنین مدل آشفتگی Local k-٤ به دلیل صفر کردن مؤلفهٔ ٤ در معادلات پنج گانه باعث افزایش سرعت و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی و نهایتاً افزایش آب شستگی می شود.

حساسیت نسبت به مش در این بخش به بررسی تأثیر ابعاد شبکه، بر تخمین عمق حفرهٔ آبشستگی ناشی از جت ریزشی در مصالحی با قطر مشخصه (d₅₀) مختلف توسط مدل SSIIM پرداخته شده است. به منظور صحت سنجی واسنجی زبری با توجه به تمام موارد پیشنهادی محققان در خصوص انتخاب ارتفاع زبریها برابر قطر شاخص رسوبات بستر، مقادیر مob و وول بهعنوان قطرهای شاخص زبری مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعات عمق بیشینهٔ فرسایش برای مقادیر مختلف قطر شاخص رسوب توسط نرمافزار تعیین شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. این مقایسه در شکل (۳) آورده شده است. ضریب همبستگی و نزدیکتر بودن نتایج عددی و آزمایشگاهی بهدست آمده برای م م نسبت به وله، در شکل نشان میدهد که وم

واسنجی مدل آشفتگی و انتقال رسوب به منظور واسنجی مدل آشفتگی و معادلات انتقال رسوب، عمق بیشینهٔ آبشستگی در کلیهٔ شرایط آزمایششده بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. مقادیر ضریب تعیین (R²) و متوسط باقی ماندهٔ مطلق به دست آمده و در جدول (۲) مقایسه شده اند. نتایج بررسی ها نشان می دهد که مدل آشفتگی شده اند. نتایج بررسی ها نشان می دهد که مدل آشفتگی به حراه معادلهٔ انتقال رسوب انگولند – هانسن بهترین هم خوانی را با نتایج آزمایشگاهی دارد و توانسته است آبشستگی پایین دست جت ریزشی را به خوبی پیش بینی کند.



بیست و ششم، شماره یک، ۱۳۹۵ سال

نشريه مهندسي عمران فردوسي

مطالعهٔ عددی آبشستگی جت ریزشی آزاد

مــدل، نتــایج حاصــل از مـــــدل عــددی بــا نتــایج آزمایشگاهی چن مقایسه گردیده است [12].

فلوم استفاده شده توسط چن دارای طول ۱۱/۵ متر، ارتفاع ۲/۱ متر، عرض ۲/۳ متر می باشد. رسوبات در طولی برابر با ۱/۸ متر و عرض ۲/۳ متر در بستر فلوم قرار گرفتهاند. مشخصات هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی و خصوصیات رسوبات به کار گرفته شده برای بار بستر به شرح زیر می باشد.

دبی (Q) برابر ٤/۰٤ لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش (H_c) برابر ۸۵/۱۰ متر میباشد. رسوبات به کار رفته در آزمایش از جنس ماسهٔ دانهبندی شده، یکنواخت و با چگالی مخصوص ۲/٦۳ میباشد. همچنین 4₅0 بهعنوان قطر مشخصهٔ ذرات، و رسوباتی با اقطاری برابر با شده است. عمق پایاب در تمام آزمایش ها ثابت و برابر با ۲/۰۳۷ متر درنظر گرفته شده است [12].

مشخصات ميدان حل

در مدلسازی عـددی از سـه شـبکه بـا ابعـاد مختلف استفاده شده است. نسبت ابعاد مش در پلان (x/y) بـه ترتیـب ۰.۰٤٤ و ۰.۰۸۸ و ۱۷۷. انتخـاب گردیدنـد.

همچنین در شبکههای مدلسازی شده، ابعاد مش در عمق (x/z) دارای نسبتهای ۳۷۷ و ۷۵۰ و ۱.۵۱۱ میباشد. بنابراین تعداد سلولها در این مدلسازی به ترتیب زیر میباشد.

600*4*34 (i=601, j=5, k=35) 300*4*34 (i= 301, j=5, k=35) 150*4*34 (i=151, j=5, k=35) همانطور که در جداول (۳) تا (۵) مشاهده ۳۰۱×0×0×0 شبکهٔ ۳۵×0×0×۱×0

می سود حبق ارمون می ما و ساید می ساید می می می ارتفاع توانسته است عمق حفرهٔ آب شستگی و هم چنین ارتفاع پشتههای رسوبی را دقیق تر نسبت به شبکهٔ ۳۵×۵×۱۰۱ پیش بینی نماید. البته شبکهٔ با تعداد سلول ۳۵×۵×۱۰۱ نتایج دقیق تری نسبت به دو شبکهٔ دیگر داده است. لیکن اختلاف معنی داری بین نتایج به دست آمده از این شبکه و شبکهٔ درشت تر با تعداد سلول ۳۵×۵×۱۰۲ وجود ندارد. از طرف دیگر، برای تحلیل های جریان و رسوب در شبکه با ابعاد ریز زمان محاسباتی بیشتری لازم است لذا شبکه با تعداد سلول ۳۵×۵×۳۰ مناسب برای مدل سازی عددی انتخاب گردید.



شکل ٤ شکل شماتیک فلوم به کار رفته در آزمایش [12]

سال بيست و هشتم، شمارهٔ دو، ١٣٩٥

نشريهٔ مهندسي عمران فردوسي

۱۵

نتايج أزمون	نتايج أزمون	حداکثر عمق آبشستگی(m) در مدل	حداکثر عمق آبشستگی	قطر مشخصة ذرات
MAE	R ²	عددی با شبکهٔ ۳۵×۵×۱۰۱ سلولی	در مدل آزمایشگاهی (m)	(mm)
•/• \ \	۰/۹۶۱	•/•٧١١•	•/•٨	d ₅₀ =6.73
•/••٣	•/99٣	•/• ۵ ٧۶۵	• • ۶	d ₅₀ =11
٠/•١٢	٠/٩۵١	•/•۴۱۱۱	٠/•۴۵	d ₅₀ =15.58
•/• • ٢	٠/٩٨٨	•/•TQN	٠/٠ ٢٨	d ₅₀ =22.03

جدول ۳ نتایج آزمون R² و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکهٔ ۳۵×۵×۲۰

			C	
نتايج آزمون	نتايج آزمون	حداکثر عمق آبشستگی(m) در مدل	حداکثر عمق آبشستگی	قطر مشخصة ذرات
MAE	R^2	عددی با شبکهٔ ۳۵×۵×۱۰ سلولی	در مدل آزمایشگاهی (m)	(mm)
۰/۰۱۳	•/907	•/•VY•A	•/•٨	d ₅₀ =6.73
•/••٣	•/٩٩•	•/• ٥٣٥٦	•/•٦	d ₅₀ =11
•/•1٣	•/932	•/•٣٩•٩	•/•٤0	d ₅₀ =15.58
•/••٢	•/9/1	• / • 75 ٣٦	•/• 7 ٨	dso=22.03

جدول ٤ نتایج آزمون R² و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکهٔ ۳۰×۵×۳۰

101×0×70	و مدل عددی با شبکهٔ	MAE در مدل آزمایشگاهی	، نتابح آزمون R ₂ و	جدول ٥
			J 2 O J - (· • • • • • •

نتايج	نتايج آزمون	حداکثر عمق آبشستگی(m) در مدل	حداکثر عمق آبشستگی	قطر مشخصة ذرات
آزمون MAE	R^2	عددی با شبکهٔ ۳۵×۰۵×۱۰۱ سلولی	در مدل آزمایشگاهی (m)	(mm)
•/• * *	•//0	۰/۰ ٦٨٩١	•/•A	d ₅₀ =6.73
•/•11	•/907	•/•٤0•٢	•/•٦	d ₅₀ =11
•/•12	۰/AV۱	•/•٣٣٣١	•/•٤0	d ₅₀ =15.58
•/••٨	•/911	•/• 1211	·/·YA	d ₅₀ =22.03

[12]. در تحقیق حاضر با تغییر شرایط دبی، قطر ذرات بستر و ارتفاع ریزش نتایج مدل آزمایشگاهی ایشان توسعهدادهشده و اطلاعات جامعتری نسبت به آبشستگی ناشی از جت ریزشی استخراج گردیده است [12].

مشخصات میدان حل

در مدلسازی عددی، محدودهٔ شبیهسازی شده از فلوم آزمایشگاهی چن دارای طول ۲ متر و عرض ۲۰، متر میباشد. مدلسازی جریان و رسوب برای شرایط زیر صورت گرفته است: ارتفاع ریزش آب ۲/۲۰، ۲۷/۰ و ۰/۳۷ متر برای دبیهای ۲/۳ و ۰/۵ و ۲/۹ لیتر بر ثانیه، عمق جریان در پس از واسنجی مدل عددی و انتخاب ابعاد مناسب شبکه در مدل عددی، شبیهسازی جریان و رسوب توسط مدل عددی صورت گرفته و پس از تعیین اثر پارامترهایی نظیر ارتفاع ریزش، عدد فرود مصالح، و قطر مشخصه ذرات بر حداکثر عمق آب شستگی ناشی از جت ریزشی، به تحلیل نتایج آنها پرداخته شده است. در ادامه سعی شده است پارامترهای تأثیرگدار

مدلسازی عددی و تحلیل نتایج

در ادامی سعی سعی است پرسریای دیر سرد. بهصورت بدون بعد درآورده شود تا بتوان نتایج کلیتری از بررسیهای صورت گرفته بهدست آورد.

م**شخصات مدل آزمایشگاهی** مطالعهٔ چن مبنای مدلسازی تحقیق حاضر مییاشد

نشريهٔ مهندسي عمران فردوسي

بالادست برابر y=0.04 متر، عمق پایاب برابر y=0.15 متر و قطر مشخصهٔ ذرات (d₅₀) برابر با ۲،۱، ۲، ۲ و ٤ میلیمتر در مدلسازی عددی انتخاب گردیدند.

شبکهٔ انتخابشده دارای نسبت x/y=0.088 در طول و برای ارتفاع H=0.37, 0.27, 0.22 بهترتیب دارای نسبت مشبندی x/z=1.367,1.227,1.067 در عمق میباشد. شکل (۵) محدودهٔ مدلشده و ابعاد شبکه را نشان میدهد.

به دلیل پیچیدگی پدیدهٔ آبشستگی و دخیل بودن پارامترهای متعدد در آن، در تحقیق حاضر سعی شده است با بررسی مهمترین پارامترهای مؤثر در آبشستگی جت ریزشی شناختی جامع از این پدیده حاصل گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۵ شبکهٔ بهکار رفته در مدلسازی عددی برای عمق H=0.37 الف) در افق، ب) در مقطع

عدد فرود مصالح بهدلیل درنظر گرفتن تأثیر توأمان مشخصه های رسوب و شرایط جریان، از مهمترین پارامترهای مؤثر در آب شستگی جت ریزشی می باشد. محدودهٔ عدد فرود مصالح در تحقیق حاضر بین ۱/۰۸ تا ۸/۲۵ می باشد. عدد فرود جریان در بالادست جت ریزشی نیز به دلیل تأثیر در انرژی جت و قابلیت حمل مواد رسوبی یکی دیگر از پارامترهایی است که در تحقیق حاضر از آن استفاده شده است.

نشريهٔ مهندسی عمران فردوسی

محدودهٔ عدد فرود جریان بین ۱۳۹۸ تا ۱۸۹۸ میباشد. بنابراین محدودهٔ پارامترهای مؤثر به گونهای انتخاب شده که حتیالامکان دربرگیرندهٔ شرایط مختلف جریان و رسوب باشد. در این تحقیق با درنظر گرفتن تغییر شرایط جریان و رسوب، در مجموع تعداد ۳۲ بار مدلسازی عددی برای مطالعه بر روی آبشستگی جت ریزشی انجام شده است.

تأثیر عدد فرود مصالح بر آبشستگی پاییندست جت ریزشی

قطر ذرات رسوب بدون شک تأثیر زیادی بر ابعاد حفرهٔ آبشستگی دارد. در حقیقت عمق آبشستگی با تغییر اندازهٔ مصالح بستر، به علت تغییر تنش برشی مقاوم در برابر حرکت، برای ذرات بستر تغییر میکند. با تغییر قطر ذرات عدد فرود مصالح (Fr_d) (معادلهٔ ۱۱) نیز تغییر می نماید.

$$Fr_{d} = \frac{V}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}}$$
(11)

که در آن v سرعت جت، d₅₀ قطر مشخصه، s چگالی نسبی مصالح میباشد.

شکل (٦) عمق آبشستگی تابع عدد فرود مصالح نشان داده شده است.





همانطور که در این شکل مشاهده میشود با افزایش عدد فرود مصالح، عمق آبشستگی افزایش

مییابد. این روند افزایش در هر سه ارتفاع ریزش آب اتفاق میافتد. طبق معادلهٔ (۱۱) عدد فرود مصالح با م₅₀ رابطهٔ عکس و با سرعت جریان رابطهٔ مستقیم دارد. بنابراین با کاهش ابعاد مصالح بستر و افزایش دبی جریان، عمق آبشستگی افزایش مییابد. الگوی آبشستگی در چالهٔ فرسایشی ایجادشده تابع الگوی سرعت جریان و همچنین آشفتگی جریان میباشد. در شکل (۷) الگوی جریان توسط بردارهای سرعت که اندازهٔ این بردارها معرف مقدار سرعت جریان در هر نقطه میباشد، نشان داده شده است.



شکل ۷ نمایی از بردارهای سرعت درون حفرهٔ آبشستگی

همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود شکل گیری حفرهٔ آب شستگی از محل برخورد جت به بستر که دارای بیشترین سرعت می باشد شروع می گردد. با ایجاد حفره و حرکت جت به درون آن، جریانهای چرخشی شکل می گیرد و موجب خارج شدن ذرات ریزدانه از درون حفره می شود و وضعیت باثبات برسد. این ذرات در دهانهٔ خارجی حفره جایی که از پتانسیل های سرعت و اغتشاش جریان کاسته می شود، رسوب می کنند.

> تأثیر عدد فرود جریان بر آبشستگی پاییندست جت

عدد فرود جریان یکی از مهمترین عوامل مؤثر در پدیدهٔ آبشستگی پاییندست جتهای ریزشی میباشد زیـرا

۱۷

مستقیماً با سرعت و دبی جریان در ارتباط است. با افزایش عدد فرود جریان، سرعت و پتانسیل فرسایشی جت افزایش می یابد و درنتیجه حداکثر عمق حفره آبشستگی افزایش می یابد. اثر این پارامتر بر آبشستگی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان-طور که مشاهده می شود با افزایش عدد فرود مقدار حداکثر عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد و این روند در هر سه دبی اتفاق میافت. . همچنین در یک ارتفاع ریزش ثابت با افزایش عدد فرود حداکثر عمق آب شستگی نیز افزایش مییابد زیرا با افزایش عدد فرود جریان، سرعت جریان افزایش می یابد و درنتیجه نیروهای اعمال شده توسط جریان بر بستر و عمق آبشستگی افزایش می یابد. عمق آبشستگی را مي توان وابسته به توان فرسايش يذيري جريان نيز مرتبط نمود. با افزایش عدد فرود جریان، توان فرسایش پذیری جریان افزایش مییابد، قدرت حمل و جابه جایی مصالح افزایش پیدا میکند و درنتیجه، به عمق آب شستگی افزوده می شود. نتایج مدلسازی نشان میدهد که با افزایش ٥٢٪ عدد فرود جریان حداکثر عمق آبشستگی ٤٤٪ می یابد.

تأثیر ارتفاع ریزش بر آب شستگی پایین دست جت ریزشی می اتثیر ارتفاع ریزش بر میزان آب شستگی کمی پیچیده می باشد زیرا از یک سو با افزایش ارتفاع ریزش جت تا سطح پایاب، سرعت جت افزایش می یابد از سویی دیگر به علت اغتشاش داخلی، ورود هوا به داخل جت ریزشی افزایش می یابد و نیروی کشش سطحی کاهش می پذیرد و درنهایت جت آب و مخلوط هوا انرژی اولیه خود را از دست می دهد تا منجر به کاهش آب شستگی گردد. در بررسی های صورت گرفته در محدودهٔ تغییرات ارتفاع ریزش تعیین شده، ورود هوا به جریان صورت نگرفته است و اثرات کاهندگی در

سال بیست و هشتم، شمارة دو، ۱۳۹۵

نشريهٔ مهندسی عمران فردوسی



همان طور که در شکل (۹) مشاهده می شود، با افزایش ارتفاع ریزش، مقدار حداکثر عمق آب شستگی نیز افزایش می یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود جریان و دو مقدار قطر مشخصهٔ ذرات اتفاق می افتد. با افزایش ارتفاع ریزش، سرعت اولیهٔ برخورد جت به سطح آب افزایش می یابد و درنتیجه عمق نفوذ جت به درون آب بیشتر می شود و جت نیروی بیشتری به بستر وارد می کند و درنتیجه حداکثر عمق آب شستگی افزایش می یابد. نتایج مدل سازی نشان داد که با افزایش می یابد.



شکل ۸ تأثیر عدد فرود جریان بر حداکثر عمق آبشستگی در ارتفاع ریزش های متفاوت بهترتیب , d50=0.003 mm d50=0.004 mm,







شناسایی پارامترهای مؤثر در آبشستگی جت ریزشی به منظور بررسی دقیقتر عوامل تأثیرگذار بر آبشستگی و تعیین حداکثر عمق آبشستگی، تجزیه و تحلیل ابعادی صورت گرفته است. به صورت کلی ۹ عامل تأثیرگذار شناسایی گردیدهاند که در رابطهٔ (۱۲) این عوامل نشان داده شدهاند.

 $d_{s} = f_{1}(U, y, y_{t}, \rho, \rho_{s}, g, v, d_{50}, H_{c})$ (۱۲) U ، که در آن $d_{s} = d_{s}$ آب شستگی سرعت جریان، y عمق جریان در بالادست، ρ چگالی

آب، $\rho_{s} = p_{s}$ کالی رسوب، g شتاب ثقل، v لزجت آب، $\rho_{s} = p_{s}$ مشخصه ذرات، $y_{t} = a_{s0}$ من پایاب و H_{c} ارتفاع d_{50} ریزش میباشد. با ترکیب پارامترهای ρ_{s} ρ_{s} و g عبارت

سال بیست و هشتم، شمارهٔ دو، ۱۳۹۵

۱٩

 Δg بهدست می آید که در آن 1-s= Δ که s چگالی نسبی می باشد. بنابراین به جای ۳ پارامتر ρ , ρ و g می توان از پارامتر ΔG در تجزیه و تحلیل ابعادی استفاده نمود. بنابراین تعداد پارمترهای مؤثر در آب شستگی از ۹ به ٦ کاهش می یابد و درنتیجه با داشتن ۱۰ عامل و تعداد سه بعد اصلی (طول، زمان و جرم) می توان ۷ عدد بدون بعد به صورت رابطهٔ (۱۳) تعریف نمود.

$$\widetilde{\mathbf{d}}_{s} = \mathbf{f}_{1}(\mathbf{F}\mathbf{r}_{d}, \widetilde{\mathbf{d}}, \widetilde{\mathbf{H}}, \mathbf{F}\mathbf{r}, \mathbf{R}\mathbf{e}, \widetilde{\mathbf{y}}_{t})$$
 (17)

$$\widetilde{d} = \frac{d_{s_0}}{y}$$
, $\widetilde{d}_s = \frac{d_s}{y}$, $\widetilde{y}_t = \frac{y_t}{y}$ في المناب $\widetilde{d}_s = \frac{d_s}{y}$, $\widetilde{fr}_s = \frac{U}{\sqrt{\Delta gd_{s_0}}}$, $\widetilde{H} = \frac{H_c}{y}$

با توجه به آشفتگی جریان در مجاورت بستر و بالا بودن عدد رینولدز در کلیهٔ حالات جریان، تنشهای ویسکوز در جریان ناچیز است و عملاً تأثیر ویسکوزیته بر حرکت سیال ناچیز میباشد. همچنین با ثابت بودن عمق پایاب و سراب برای یک دبی مشخص جریان، عملاً نسبت پا y/ y از معادلهٔ بالا حذف می گردد. در ادامه پارامتر بدونبعد آب شستگی نسبت به دیگر پارامترها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

تأثیر پارامتر بی بعد عدد فرود مصالح بر نسبت عمق آب شستگی. در شکل (۱۰) تأثیر پارامتر بدون بعد عدد فرود مصالح بر نسبت آب شستگی بدون بعد بررسی می گردد. همان طوری که مشاهده می شود، با افزایش عدد فرود مصالح برای مقادیر مختلف نسبت ارتفاع ریزش (H₀/y) نسبت عمق آب شستگی (V₈b) افزایش می یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود اتفاق می افتد. دلیل آن را می توان به افزایش سرعت جریان و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی جت و

سال بیست و هشتم، شمارة دو، ۱۳۹۵

همچنین کاهش اندازهٔ مصالح و درنتیجه کاهش نیـروی مقاوم در برابر حرکت مرتبط دانست.



شکل ۱۰ تأثیر عدد فرود مصالح بستر و ارتفاع نسبی ریزش بر عمق آبشستگی نسبی برای مقدار ثابت Fr=0.918

همچنین در یک عدد فرود مصالح ثابت با افزایش نسبت ارتفاع ریزش نسبت عمق آبشستگی افزایش می یابد که این روند در اعداد فرود بالا تأثیر گذاری بیشتری دارد. با ثابت نگه داشتن پارامترهای دیگر تغییرات عدد فرود مصالح در برابر نسبت عمق آبشستگی بهصورت خطی تغییر میکند. نتایج مدلسازی نشان داد که با افزایش ۸۷٪ عدد فرود مصالح، حداکثر عمق آبشستگی ۸۳٪ افزایش می یابد.

تأثیر پارامتر بی بعد نسبت ارتفاع ریزش بر نسبت عمق آب شستگی

عمق آبشستگی نسبی تابع ارتفاع ریزش نسبی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ تأثیر ارتفاع نسبی ریزش و قطر نسبی مصالح بر عمق آبشستگی نسبی برای مقدار ثابت Fr=0.758

نشريهٔ مهندسی عمران فردوسی

افزایش (d₅₀/y) مقادیر (d_s/y) به سمت یک عدد ثابت میل میکند. این نسبت در مقادیر d₅₀/y بیشتر از ۰/۱ اتفاق میافتد. این نسبت میتواند به عنوان شاخص مصالح حفاظت بستر در محل جت ریزشی مورد استفاده قرار گیرد. نمودار عمق آبشستگی تابع قطر نسبی ذرات به صورت نمایی میباشد.

نتيجهگيرى

درخصوص آبشستگی جت ریزشی تحقیقات آزمایشگاهی زیادی صورت گرفته است. در این تحقيقات، توجه محققان به حصول حداكثر عمق آبشستگی در فرآیند فرسایش پاییندست جت ريزشي معطوف بوده است. تأثير عوامل مختلف شامل خصوصیات رسوب و مشخصه های جریان در قالب عددهای بدونبعد ارائه گردیده است. در تحقیق حاضر، فرآیند آب شستگی به صورت عددی با استفاده از نرمافزار SSIM صورت گرفته است. برای نیل به ایس هدف، ابتدا واسنجی مدل عـددی بـا اسـتفاده از نتـایج آزمایشگاهی صورت گرفت. مدل آشفتگی مناسب مدل k-ε ، زبری اعمالشده در مدل قطر متوسط مصالح و معادلهٔ انتقال بار بستر معادلـهٔ انگلونـد-هانسـن تعیـین گردید. سپس حساسیت سنجی نسبت به ابعاد مـش در مدل عددی صورت گرفت و مشخص گردید کـه یـک شبکه ۳۵×٥×۲۰۱ سلولی می تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید.

در ادامه، با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی، عوامل بدونبعد تعیین گردیدند و نتایج عددی در قالب پارامترهای بدون بعد تحلیل شدند. در تحلیلهای صورت گرفته، عمق فرسایش نسبی که نسبت عمق فرسایش بستر به عمق جریان در بالادست محل ریزش جریان میباشد، در تابعیت از پارامترهای مختلف دیگر شامل عدد فرود، عدد فرود مصالح، ارتفاع نسبی ریزش و قطر نسبی مصالح بررسی گردید. و نتایج زیر بهدست آمد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش قطر مصالح (d₅₀/y) نسبت عمق آب شستگی (d_s/y) نسبت ارتفاع ریزش (H_o/y) برای مقادیر مختلف نسبت افزایش می یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود اتفاق می افتد. با افزایش ارتفاع ریزش، سرعت جت بر خوردی با بستر نیز افزایش می یابد و سبب افزایش عمق نسیی آب شستگی می گردد.

تأثیر پارامتر بی بعد نسبت قطر مشخصهٔ ذرات بر نسبت عمق آب شستگی

در شکل (۱۲) عمق آب شستگی نسبی برحسب قطر نسبی مصالح نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود با افزایش نسبت قطر مصالح برای مقادیر مختلف اعداد فرود نسبت عمق آب شستگی کاهش می یابد که این روند برای هر سه مقدار (Ho/y) اتفاق می افتد. علت آن را می توان افزایش مؤلفه های مقاومت ذره در برابر حرکت از جمله وزن دانهٔ رسوب نام برد. در عدد فرود و ارتفاع ریزش ثابت نیروی بیشتری برای جابه جایی ذرات نیاز می باشد.



شکل ۱۲ تأثیر نسبت قطر مصالح بر نسبت عمق آبشستگی برای اعداد فرود متفاوت و ارتفاع نسبی ریزش ثابت Hc/y=5.5

موضوع دیگر این که هرچه نسبت (d₅₀/y) بیشتر باشد تأثیر عدد فرود جریان بر عمق آبشستگی کاهش مییابد و بهنظر میرسد به سمت یک مقدار ثابت میل میکند. همچنین بررای مقادیر ثابت عدد فرود با

۲.

۲١

عمق آبشستگی نسبی تابع خطی از عـدد فـرود مصالح بستر میباشد، بهصورتی که تغییرات عدد فـرود مصالح بستر در محدودهٔ ۲ تا ۱۰، منجر به افزایش عمق فرسایش ۱ تـا ۳ برابـر عمـق جریـان بـرای محـدودهٔ تغییرات ارتفاع نسبی ۵ تا ۱۰ میگردد.

یک رابطهٔ خطی با شیب مثبت بین عمق فرسایش نسبی و ارتفاع ریزش نسبی وجود دارد بهصورتی که با افزایش ارتفاع نسبی ۵/۵ تا ۵/۹ میزان فرسایش از ۲/۵ تا ۹ برابر عمق جریان در محدودههای قطر نسبی ذرات بین ۰/۷۰۰ تا ۰/۱ متغیر میباشد.

یک رابطهٔ نمایی کاهشی بین عمق نسبی فرسایش و قطر نسبی مصالح بستر برای شرایط مختلف جریان وجود دارد بهصورتی که مقدار فرسایش از ۸ تا ۲ برابر عمق جریان در کانال را برای مقادیر مختلف قطر نسبی ذرات از ۰/۰۱ تا ۱/۰ در شرایط مختلف جریان در بالادست برای عدد فرود متغیر بین ٤/۰ و ۹/۰ را نشان نسبی ذرات، ضمن کاهش عمق آبشستگی، وابستگی عمق آبشستگی به شرایط هیدرولیکی جریان بالادست کم می گردد بهصورتی که برای مصالحی با

قطر متوسطی در حدود ۱۰ درصد عمق جریان، تحت شرایط مختلف جریان در بالادست، عمق آبشستگی به ۲ برابر عمق جریان محدود می گردد. این نتیجه می تواند در انتخاب مصالح پوشش پایین دست جت ریزشی برای به حداقل رسانیدن عمق فرسایش، مؤثر باشد.

نتایجی که می توان از مدل عددی و اسنجی شده به دست آورد بسیار فراتر از نتایجی است که در آزمایشگاه حاصل می گردد. در آزمایشگاه، به سبب محدودیت هایی از جمله تأمین دبی، فضای آزمایشگاهی و همچنین هزینه های مربوط به آزمایشها، دامنهٔ تغییرات پارامترها زیاد نمی باشند. لیکن در مدل عددی و اسنجی شده، می توان اطلاعات بیشتری را پردازش نمود و نتایج بیشتری به دست آورد. آزمایشگاه اندازه گیری نشده اند را از نتایج مدل عددی به دست آورد. بنابراین مدلهای عددی می توانند ابزاری باشند برای تعمیم داده های آزمایشگاهی و استخراج من من مخلف می داده می می از مایشدای مخلف که در آزمایشگاه قابل حصول نمی باشد.

مراجع

- 1. Stein, O,R. and Julien, P.Y., "Sediment concentration below free overfall", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 9, pp. 622-624, (1994).
- 2. Abida, H. and Townsend, R.D., "Local scour downstream of box-culvert outlets", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 3, pp. 425-440, (1991).
- Westrich, B., Kobus, H., "Erosion of uniform sand bed by continuous and pulsating jet", Proceedings of IAHR ccongress, No. 1(A13), Istanbul, (1973).
- Martins, R., "Contribution to the knowledge on scour action of free jets on rocky river beds", 11th Inter, Comm, on large dams, IIQ41. R44, (1973).
- 5. Jaeger, C. h., "Uber die ahnlichkeit bei flussbaulichen modellversuchen", Wasserwirtschaft und wassertechnik, No. 23/27, (1973).
- 6. Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D., "Local scour due to free overfall jets", Journal of

Water Management, Vol. 4, pp. 253-260, (2006).

۷. محبوبی، ۱، "اثر قطر مصالح بر میزان آبشستگی ناشی از جت های ریزشی آزاد"، پایاننامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۷۵).

- Mercier. F., Bonelli, S., Anselmet, F. and Pinettes, P., "On the numerical modelling of the Jet Erosion Test", 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, (2012).
- 9. Wanyun, X., Wenxin, H. and Zhongdong, Q., "Numerical simulation of sediment erosion by submerged plane turbulent jets", 9th International Conference On Hydrodynamics, shanghai, (2010).

10. Olsen, N.R.B., "SSIIM User's Manual for Version 1 and 2", (2011).

 ۱۱. سلامتیان، س.۱.، "بررسی نرخ آب شستگی پاییندست جتهای ریزشی در مصالح یکنواخت"، پایان نامهٔ کار شناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (۱۳۸۵).

- 12. Chen, J.Y., Ming, Y. and Hong, Y.M., "Characteristics of check dam scour hole by free over-fall flow", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 6, pp. 673-680, (2001).
- Van Rijn, L.C., "Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Delft Hydr, Communication, No. 382, (1987).
- 14. Engelund, F. and Hansen, E., "A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams", Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, (1972).
- Einstein, H.A. and Chien, N., "Effects of Heavy Sediment Concentration near the Bed on Velocity and Sediment Distribution", U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division Sediment Series No. 8, (1955).
- Wu, W., Rodi, W. and wenka, T., "3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels", J. Hydr. Engrg, ASCE Vol. 1, pp. 4-15, (2000).