

«یادداشت تحقیقاتی»

استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی

سید مرتضی سادات هلبر^۱، ابراهیم امیری تکلدانی^{۲*}، فاطمه درزی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

* کرج، صندوق پستی ۴۱۱۱-۳۱۵۸۷

amiri@ut.ac.ir

چکیده- سرعت سقوط ذرات رسوبی یکی از پارامترهای مهم در پدیده انتقال رسوب، ریخت‌شناسی بستر و سواحل رودخانه‌ها، رسوبگذاری در مخازن سدها و نیز طراحی حوضچه‌های رسوبگیر در شبکه‌های انتقال آب است. به منظور تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی، تاکنون روابط متعددی ارائه شده که بر حسب محدودیت‌های موجود در آنها و نیز دقت حاصل، مورد استفاده محققان و طراحان مختلف قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مدلی برای برآورد سرعت سقوط ذرات رسوبی ارائه شده است. شبکه عصبی این تحقیق با استفاده از ۱۱۵ گروه داده اندازه‌گیری شده در تحقیقات مختلف (با مشخصات متفاوت سیال و رسوب) و با توجه به پارامترهای موثر بر سرعت سقوط ذرات رسوبی، طراحی و صحت‌سنجی شد. در مدل شبکه عصبی، شبکه پرسپترون چندلایه با قانون یادگیری انتشار سریع برای بازیابی نگاشت غیرخطی میان ورودی‌های شبکه (متغیرهای مستقل) و خروجی شبکه (متغیر وابسته) به گونه‌ای طراحی شد تا از این طریق، تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی میسر شود. برای بررسی دقت مدل در پیش‌بینی سرعت سقوط ذرات، خروجی‌های مدل با نتایج حاصل از ۱۴ مدل آزمایشگاهی و تحلیلی که توسط سایر محققان ارائه شده، با استفاده از معیارهای ضریب همبستگی و میانگین خطای نسبی مقایسه شد. نتایج حاصل از مقایسه، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر مدل‌ها است.

کلید واژگان: سرعت سقوط، شبکه عصبی مصنوعی، مهندسی رودخانه، ذرات رسوبی، چگالی نسبی.

۱- مقدمه

تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی سرعت سقوط ذرات رسوبی در منابع گزارش شده که حاصل بیشتر آنها روابطی تجربی یا نیمه تجربی برای تخمین سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی است. تحقیقات مذکور برای کاربرد در کارهای مهندسی رودخانه دارای محدودیت‌هایی هستند. برای مثال، روابط Stokes (1851) [برگرفته از Graf (1971)]، Rouse (1938)، Brown and Lawler (2003) تنها برای

سرعت نهایی سقوط ذره، سرعت رو به پایین ذره در سیال با لزجت کم در شرایط تعادلی است که در آن مجموع نیروی ثقل، نیروی بالابرنده و نیروی دراگ سیال برابر صفر است. سرعت سقوط ذرات به چگالی و لزجت سیال و چگالی، اندازه، شکل و بافت سطح ذره بستگی دارد.

ذرات کروی قابل استفاده است و حتی برای ذرات کروی هم راه حل تئوری (Stokes (1851 فقط در محدوده اعداد رینولدز کوچکتر از یک کاربرد دارد و تاکنون روشی تئوری برای تخمین سرعت سقوط ذرات رسوب طبیعی ارائه نشده است. در غیاب چنین روشهایی، برخی تحقیقات آزمایشگاهی به منظور ارائه نمودارهایی برای تخمین سرعت سقوط بر اساس قطر استاندارد ذرات ارائه شده است [مانند Rubey (1933), Graf (1971), Baba and Simons (1981)] که با یک دسته منحنی، تأثیر سایر خصوصیات ذرات بر سرعت سقوط اعمال می‌شود. [مثل Komar and Reimers (1978)]. در یکی از این تحقیقات که توسط Interagency Committee (1957) انجام شده، داده‌های آزمایشگاهی چند محقق گردآوری و تدوین شده و بر این اساس روابطی تصویری برای تخمین ضریب دراگ و در نتیجه محاسبه سرعت ته‌نشینی ارائه شده است [برگرفته از Wu and Wang (2006)]. برای تعیین سرعت سقوط از طریق این منحنی‌ها باید از چند منحنی و جدول و میانمایی بین آنها استفاده نمود. اخیراً Wu and Wang (2006) منحنی‌های Interagency Committee و روابط پیشنهادی Cheng (1997) را مورد بازنگری قرار داده و یک معادله صریح ریاضی برای تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی ارائه کرده‌اند. این محققان معادله خود را با ۹ معادله دیگر مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که معادله جدید نسبت به داده‌های آزمایشگاهی که در آنها ضریب شکل در نظر گرفته نشده با میانگین خطای نسبی ۶/۸ درصد، تخمین دقیق‌تری را نسبت به سایر معادلات به دست می‌دهد. با توجه به اینکه این مقایسه فقط برای یک گروه داده آزمایشگاهی انجام شده و از طرفی خطای معادله نیز همچنان قابل ملاحظه است، در این مقاله سعی شد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، معادله‌ای دقیق‌تر نسبت به معادلات موجود ارائه شود.

Stokes با استفاده از معادلات Navier - Stokes در مختصات قطبی، ضریب دراگ وارد بر ذره کروی در جریان سیال را در سال ۱۸۵۱ بررسی کرد (Graf 1971). بر اساس نتایج Stokes، سرعت سقوط ذره کروی در رژیم جریانی که عدد رینولدز آن کمتر از یک باشد با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است (Cheng 1997):

$$w = \frac{1}{18} \frac{g(s-1)d^2}{\nu} \quad (1)$$

که در آن w سرعت سقوط ذره (m/s)، g شتاب ثقل (m/s²)، d قطر ذرات (m)، ν لزجت سینماتیک (m²/s)، s چگالی نسبی (ρ_s / ρ) که ρ_s و ρ به ترتیب چگالی رسوب و سیال (kg/m³) است.

نتایج تحقیقات برای ذرات رسوب طبیعی منجر به ارائه روابطی مشابه با یکدیگر شده است. در اغلب این تحقیقات پارامترهای قطر ذره، ضریب شکل، چگالی نسبی رسوب، چگالی و لزجت دینامیکی سیال به‌عنوان شاخصهای مؤثر بر سرعت سقوط ذرات طبیعی در نظر گرفته شده است، در برخی تحقیقات به دلیل گستردگی تغییرات هندسی ذرات طبیعی، از تأثیر ضریب شکل در سرعت سقوط ذرات صرف‌نظر شده اما در تحقیق حاضر به منظور ارائه رابطه‌ای جامع و دقیق، فاکتور شکل نیز در فرایند طراحی و صحت‌سنجی شبکه عصبی مصنوعی ملحوظ شده است.

۲- روش تحقیق

قدم اول در ساخت مدل بر مبنای شبکه عصبی، انتخاب نوع شبکه است. در این تحقیق از شبکه عصبی با ساختار پرسپترون چند لایه با فرایند پیشرو استفاده شد. برای طراحی و آموزش شبکه عصبی، اندازه‌گیری یا جمع‌آوری تعدادی کافی از داده‌ها ضروری است. در این تحقیق تعداد ۱۱۵ دسته داده از میان داده‌های آزمایشگاهی موجود در

پس از انتخاب ۱۱۵ داده و نرمال‌سازی آنها با استفاده از رابطه (۲)، داده‌ها به سه دسته (هر یک به تعداد ۲۸، ۵۹ و ۲۸) تقسیم شده و به ترتیب به عنوان داده‌های آموزش، آزمون و تست شبکه استفاده شد. هر دسته داده شامل پنج پارامتر است که چهار تا (چگالی نسبی ذرات رسوب، ضریب شکل، لزجت دینامیکی سیال و قطر ذرات)، متغیرهای ورودی و دیگری (سرعت سقوط ذرات)، متغیر خروجی است.

انتخاب داده‌ها باید به صورتی باشد که داده‌های آموزش از گستردگی و پراکندگی خوبی برخوردار باشد تا شبکه جوابهای بهتری را نسبت به سایر مدلها ارائه دهد. انتخاب این الگو به سعی و خطا نیاز دارد. برای آموزش شبکه از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به آموزش شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) با اعمال قوانین پس انتشار خطا (BEP) و انتشار سریع (QP) برای تعیین وزنهای خروجی است. برای تعیین تعداد لایه‌های مخفی شبکه ابتدا با فرض داشتن یک لایه، اقدام به یافتن تعداد مطلوب نرون‌ها شد.

مراجع مختلف که توسط Jimenez and Madsen (2003) گردآوری و بازبینی شده، برای تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات داده‌های مزبور آورده شده است.

داده‌های ورودی پیش از آموزش شبکه عصبی به اعداد بین ۰ و ۱ نرمال شده است. خروجی تابع آستانه سیگموئیدی دو قطبی در لایه پنهان اعدادی است بین ۱ و -۱ و شکل داده‌های ورودی به آن نقش مهمی را در یادگیری شبکه ایفا می‌کند. برای ورودیهای نزدیک به صفر یا یک، تغییرات وزن نرون‌ها حداقل خواهد بود، زیرا در این اعداد عناصر پردازشگر کند عمل می‌کنند (به دلیل شکل تابع سیگموئیدی دو قطبی)، اما برای ورودیهای نزدیک به نیم پاسخ نرون‌ها به سیگنال ورودی سریعتر خواهد بود. از این‌رو، نرمال‌سازی داده‌ها به گونه‌ای انجام شد که میانگین سری داده‌ها برابر ۰/۵ شود:

$$X_{norm} = 0.5 \left[\frac{X_0 - \bar{X}}{X_{max} - X_{min}} \right] + 0.5 \quad (2)$$

که در آن X_{norm} مقدار نرمال شده ورودی X_0 ، \bar{X} میانگین داده‌ها، X_{min} و X_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌ها است.

جدول ۱ داده‌های مورد استفاده برای آموزش، آزمون و تست شبکه عصبی مصنوعی

سرعت سقوط (m/s)		قطر ذره (mm)		تعداد داده‌ها	مرجع داده‌ها	ردیف
دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین			
۰/۰۰۲ - ۰/۲۸۱	۰/۱۰۱	۰/۰۶۱ - ۴/۵	۱/۱۵۰	۳۷	Cheng (1997) ^{a,c}	۱
۰/۰۰۵ - ۰/۱۷۰	۰/۰۶۳	۰/۱ - ۱/۹	۰/۵۸۰	۲۲	Engelund and Hansen (1972) ^{c,d}	۲
۰/۰۱۷ - ۰/۰۷۵	۰/۰۴۵	۰/۱۵۲ - ۰/۶۱	۰/۳۶۹	۲۰	Hallermeier (1981) ^{b,c,d}	۳
۰/۰۱۷ - ۰/۱۵۶	۰/۰۸۲	۰/۲ - ۲	۰/۹۳۰	۱۲	Raudkivi (1990) ^{d,e}	۴
۰/۰۱۸ - ۰/۱۹۴	۰/۰۹۸	۰/۲ - ۲	۰/۹۳۰	۱۲	Raudkivi (1990) ^{d,f}	۵
۰/۰۱۹ - ۰/۲۴۰	۰/۱۱۶	۰/۲ - ۲	۰/۹۳۰	۱۲	Raudkivi (1990) ^{d,g}	۶

^e ضریب شکل برابر ۰/۵

^f ضریب شکل برابر ۰/۷

^g ضریب شکل برابر ۰/۹

^a قطر میانگین حسابی (d_n)

^b فرض $d_s/d_n \approx 0.9$

^c ضریب شکل ارائه نشده است

^d قطر اسمی (d_n)

مدل شبکه عصبی با داده‌های آزمایشگاهی از شاخص گرافیکی یعنی ضریب همبستگی استفاده شده است. بالا بودن ضریب همبستگی (بیش از ۹۵ درصد) می‌تواند نشانگر دقت مناسب مدل باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، توافق بسیار خوبی بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی (در مرحله آزمون داده‌ها) وجود دارد.

برای بررسی دقت مدل شبکه عصبی با استفاده از شاخص آماری عددی، خروجیهای مدل شبکه عصبی با نتایج حاصل از ۱۴ مدل آزمایشگاهی و تحلیلی که توسط سایر محققان ارائه شده مورد مقایسه قرار گرفت. برای محاسبه میانگین خطای نسبی از روابط زیر استفاده شد:

$$RE_{(di)} = \frac{|w_{o(di)} - w_{(di)}|}{w_{o(di)}} \quad (3)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RE_{(di)}$$

که در آن n تعداد داده‌ها، $RE_{(di)}$ خطای نسبی برای ذره‌ای به قطر di ، $w_{o(di)}$ سرعت سقوط مشاهده شده برای قطر di و MRE میانگین خطای نسبی است.

در جدول ۳ میانگین خطای نسبی برای معادلات مختلف نشان داده شده است. با توجه به این جدول، معادله پیشنهاد شده توسط Concharov (1992) با ۶۰ درصد دارای بیشترین خطا و در مقابل روابط ارائه شده توسط Madsen (2003) و Jimenez and Wu and Wang (2006) به ترتیب با ۶/۲ و ۶/۳ درصد خطا، دارای بیشترین دقت در بین معادلات تجربی است. در میان روابط موجود، مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار ارائه شده در این تحقیق، با ۴/۸ درصد خطا بیشترین دقت را دارد.

روش کار به این صورت بود که تعداد نرون‌های لایه پنهانی برابر ۱ تا ۳۵ انتخاب و برای هر حالت شبکه آموزش داده شده و مقدار میانگین مربعات خطای شبکه ثبت شد. مقایسه مقدار خطاهای محاسبه شده نشان داد که تعداد چهار نرون در لایه پنهان کمترین خطا را خواهد داشت، به طوری که خطای حاصل هم برای سری داده‌های آموزش و هم برای داده‌های آزمون دارای حداقل مقدار است.

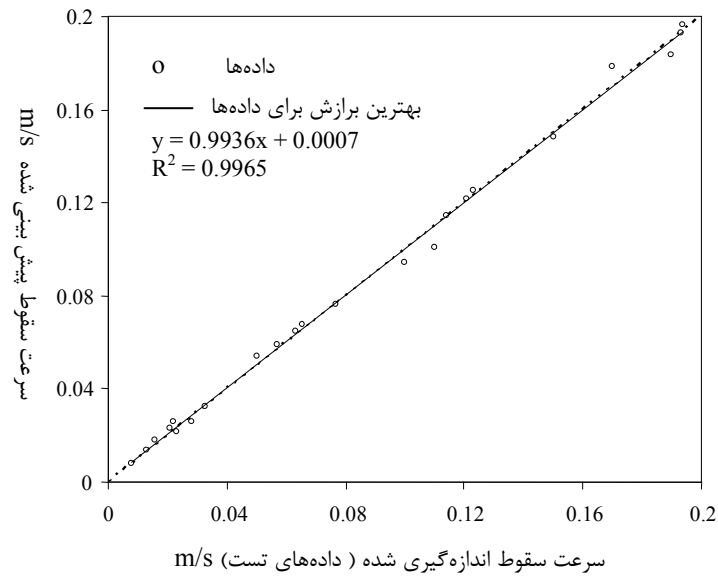
بعد از انتخاب ساختار شبکه عصبی توابع آستانه نرون‌های لایه پنهان و خروجی تعیین می‌شود. بدین منظور با شبکه‌ای با چهار نرون مخفی که در قسمت قبل تعیین شد، حالات مختلفی برای توابع آستانه نرون‌های لایه‌های میانی و خروجی در نظر گرفته شد. در نهایت با انتخاب تابع سیگموئیدی دو قطبی برای لایه پنهان و تابع خطی برای لایه خروجی مشاهده شد که شبکه دارای کمترین مقدار خطا خواهد بود. برای انتخاب مقدار بهینه آهنگ یادگیری و سایر پارامترهای یادگیری از روش سعی و خطا استفاده شده است. این کار با استفاده از شبکه‌ای با چهار نرون در لایه پنهان و توابع خطی و سیگموئیدی دو قطبی به ترتیب در لایه خروجی و پنهان و همچنین انتخاب مقادیر مختلف آهنگ یادگیری در محدوده ۰ و ۱ انجام شده است. مشاهده شد که با انتخاب آهنگ یادگیری برابر ۰/۰۱ خطای آموزش شبکه به حداقل مقدار آن رسید. بعد از تعیین تعداد لایه، تعداد نرون، توابع آستانه که در قسمتهای قبلی ذکر شد، آموزش نهایی شبکه انجام شد. در جدول ۲ مشخصات اصلی ساختار شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

برای ارزیابی مدلها، شاخصهای آماری متفاوتی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو گروه شاخصهای گرافیکی و شاخصهای عددی تقسیم کرد. در این تحقیق برای مقایسه

جدول ۲ ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی

تابع انتقال		نرون		تعداد لایه‌ها
لایه خروجی	لایه پنهان	لایه خروجی	لایه پنهان	
<i>purelin</i>	<i>tan sig</i>	۱	۴	۲



شکل ۱ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی (در مرحله آزمون داده‌ها)

جدول ۳ میانگین خطای نسبی تخمین سرعت سقوط ذرات رسوبی برای مدل‌های مختلف

ارائه دهنده	میانگین خطای نسبی (درصد)
Rubey (1933)	۱۴/۹
Zanke (1977)	۱۰/۶
Hallermeier (1981)	۱۰/۲
Dietrich (1982)	۱۹/۵
Van Rijn (1989)	۱۰/۸
Concharov (1992)	۶۹/۰
Zhang (1993)	۷/۰
Zhu and Cheng (1993)	۸/۹
Julien (1995)	۱۳/۸
Soulsby (1997)	۱۱/۰
Cheng (1997)	۹/۲
Jimenez and Madsen (2003)	۶/۲
She et al. (2005)	۱۲/۹
Wu and Wang (2006)	۶/۳
مدل شبکه عصبی مصنوعی (تحقیق حاضر)	۴/۸

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از ۱۱۵ گروه داده آزمایشگاهی، نوعی شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی سرعت سقوط ذرات رسوبی طراحی و صحت سنجی شد. برای مقایسه خروجی شبکه عصبی مصنوعی با معادلات ارائه شده در تحقیقات گذشته، تعداد ۱۴ معادله معتبر شناسایی و گردآوری شد. پس از تعیین میانگین خطای نسبی شبکه عصبی مصنوعی و سایر معادلات نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، مشخص شد که خروجی شبکه عصبی مصنوعی دارای بیشترین دقت است. از این رو در برآورد سرعت سقوط ذرات رسوبی، می توان وزن نهایی اتصالات شبکه و تابع تبدیل مورد استفاده را در یک مدل عددی برای محاسبه سرعت سقوط ذرات رسوبی در مدلسازی مسائلی از قبیل سازوکار انتقال رسوب، ریخت شناسی، تعیین ابعاد حوضچه‌های ترسیب و رسوب گذاری در مخازن سدها به کار گرفت.

۵- سپاسگزاری

در این تحقیق از داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی تحقیقات بسیاری استفاده شد. در جمع‌آوری داده‌ها از نظرات و کمکهای فراوان آقای Jimenez، استاد دانشگاه بارسلونا استفاده شد. نویسندگان نهایت تقدیر و سپاس را از ایشان دارند. همچنین نویسندگان از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران نیز کمال تشکر را دارند.

۶- فهرست علائم

$RE_{(di)}$	خطای نسبی برای قطر di
s	چگالی ویژه ($s=p_s/\rho$)
S_f	ضریب شکل $c/(ab)^{0.5}$
w	سرعت سقوط

$w_{(di)}$	سرعت سقوط پیش بینی شده برای قطر di
$w_{o(di)}$	سرعت سقوط مشاهده شده برای قطر di
v	لزجت سینماتیک
ANN	شبکه عصبی مصنوعی
d	قطر ذرات رسوبی
d_N	قطر اسمی
d_s	قطر الک
g	شتاب ثقل
MRE	میانگین خطای نسبی
R^2	ضریب همبستگی

۷- منابع

منه‌اج، م. ب. (۱۳۷۷). مبانی شبکه های عصبی مصنوعی. مرکز نشر دانشگاهی صنعتی امیر کبیر. تهران.

Baba, J. and Simons, D. B. (1981). "Measurements and analysis of settling velocities of natural quartz sand grains". J. Sediment. Petrol. 51(2), pp. 631-640.

Brown, P. P., and Lawler, D. F. (2003). "Sphere drag and settling velocity revisited." J. Environmental. Eng., 129(3), pp. 222-231.

Cheng, N. S. (1997). "Simplified settling velocity formula for sediment particle." J. Hydraulic Eng., ASCE, 123(8), pp. 149-152.

Dietrich, W.E. (1982). "Settling velocity of natural particles." Water Resource Research. 18(6), pp. 1615-1626.

Graf, W. H. (1971). Hydraulics of sediment transport, McGraw-Hill, New York.

Hallermeier, R. J. (1981). "Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains." Sedimentology, 28(6), pp. 859-865.

Interagency Committee. (1957). "Some fundamentals of particle size analysis: A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams." Rep. No.12, Subcommittee on Sedimentation, Interagency Committee on Water Resources, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis.

Jimenez, J. A., and Madsen, O. S. (2003). "A simple formula to estimate settling velocity of

- Soulsby, R. L. (1997). Dynamics of marine sands. Thomas Telford, London, U.K.
- Van Rijn, L.C. (1989). "Handbook: Sediment transport by currents and waves." Rep. No. H 461, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- Wu, W., and Wang, S. S. Y. (2006). "Formulas for sediment porosity and settling velocity." J. Hydraulic Eng., 132(8), pp. 858-862.
- Zanke, U. (1977). "Berechnung der sinkgeschwindigkeiten von sedimenten." Mitt. DesFranzius-Instituts fuer Wasserbau, Heft 46, Seite 243, Technical University, Hannover, Germany.
- Zhu, L. J., and Cheng, N. S. (1993). "Settlement of sediment particles." Research Rep. Dept. of River and Harbor Eng, Nanjing Hydraulic Research. Inst., Nanjing, China.
- natural sediments." J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 129(2), pp. 70-78.
- Julien, Y. P. (1995). Erosion and sedimentation. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Komar, P.D. and Reimers, C.E. (1978). "Grain shape effects on settling rates." J. Geol., 86, pp. 193-209.
- Raudkivi, A. J. (1990). Loose boundary hydraulics, 3rd Ed., Pergamon Press, Oxford, U.K.
- Rouse, H. (1938). Fluid mechanics for hydraulic engineers, Dover, New York.
- Rubey, W. (1933). "Settling velocities of gravel, sand and silt particles." American Journal of Science. pp. 325-338.
- She, K., Trim, L., and Pope, D. (2005). "Fall velocities of natural sediment particles: a simple mathematical presentation of the fall velocity law." J. Hydraulic Research. 43(2): pp. 189-195.