



دانشگاه فرزندوی شیب
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی عمران

عنوان پایان نامه:

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب

مؤلف: حسین علیزاده

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
در رشته عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

استاد راهنما: دکتر محمدرضا جعفرزاده

استاد مشاور: دکتر فرزاد شهبان

شهریور ۸۸

سازمان اسناد و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران

پایان نامه حاضر تحت عنوان:

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب
که توسط آقای حسین علیزاده تهیه و در تاریخ ۸۸/۶/۲۳ به هیأت داوران ارائه گردیده است، با نمره
۱۸/۷۵ مورد تأیید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

اعضای هیأت داوران:

نام و نام خانوادگی	هیأت داوران	مرتبه علمی	امضاء
۱- دکتر محمدرضا جعفرزاده	استاد راهنما	دانشیار	
۲- دکتر فرزاد شهبان مقدم	استاد مشاور	دانشیار	
۳- دکتر جلیل ابریشمی	استاد مدعو	دانشیار	
۴- دکتر محمدرضا توکلی‌زاده	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	

تأییدیه

گواهی می‌شود این پایان‌نامه قبلاً برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده و تمامی مطالب آن بجز مواردی که نام منبع ذکر گردیده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

امضاء دانشجو: حسین علیزاده

تاریخ

امضاء استاد راهنما: دکتر محمدرضا جعفرزاده

تاریخ

تقدیر و تشکر

پایان نامه حاضر به یاری ایزد یکتا و در سایه توجهات حضرت ثامن الحجج (ع) پس از ماهها تلاش و مداومت تکمیل گردیده است.

بر خود لازم می‌دانم از صبر و بردباری و زحمات پدر و مادرم که مهمترین و اصلی‌ترین پشتیبان من در این مرحله، بلکه در تمامی دوران تحصیلی‌ام بوده‌اند، صمیمانه تشکر کنم. همچنین شایسته و سزاوار است که از زحمات و راهنمایی‌های استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمدرضا جعفرزاده به عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر فرزاد شهبان به عنوان استاد مشاور که با راهنمایی‌ها و نقطه نظرات ارزنده خود مرا در این پایان نامه یاری کردند سپاسگزاری کنم. همچنین از اساتید محترم آقای دکتر جلیل ابریشمی، دکتر محمدباقر شریفی و دکتر سید محمود حسینی که در طول دوره کارشناسی ارشد از محضرشان استفاده کردم، قدردانی می‌کنم. از دوستانم آقای مهندس محمدرضا فلاح حقگو و مهندس حمیدرضا تدین‌فر که نقش بسزایی در پیشبرد و انجام این پایان نامه داشته‌اند نهایت سپاس را بعمل می‌آورم.

حسین علیزاده

شهریور ۸۸

چکیده:

سازه‌های کنترل شیب، از کاهش تراز اضافی بستر در کانال‌های آبرفتی که شیب زیادی دارند، جلوگیری می‌کنند. آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب در بسترهای آبرفتی، پدیده پیچیده‌ای بر حسب تخمین عمق فرسایش بیشینه می‌باشد. تعیین موقعیت و عمق آبشستگی، برای طراحی فونداسیون و جلوگیری از تخریب سازه ضروری می‌باشد. مهندسين هیدرولیک تلاش‌های زیادی برای ارتباط آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب به فاکتورهای مختلف هیدرولیکی و مورفولوژیکی مثل دبی، ارتفاع ریزش، عرض سرریز، اندازه متوسط ذرات بستر و دانسیته جرمی رسوبات انجام داده‌اند. محققین مختلفی در طی چند دهه گذشته، فرمول‌هایی تجربی مبتنی بر آزمایش و نیز مشاهدات نمونه اصلی، به منظور پیش‌بینی آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، ارائه کرده‌اند. در این پایان‌نامه، از شبکه‌های عصبی مصنوعی ($ANNs$) به عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای مهندسی، برای پیش‌بینی آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، استفاده شده است. چهار پارامتر بی‌بعد مهم شامل نسبت عمق بیشینه آبشستگی به ارتفاع سازه کنترل شیب (s/z)، نسبت فاصله عمق آبشستگی بیشینه به ارتفاع سازه (XS/z)، نسبت فاصله پشته ته‌نشین شده به ارتفاع سازه (XD/z) و نسبت ارتفاع بیشینه پشته ته‌نشین شده به ارتفاع سازه (h_d/z) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل شده‌اند. اندازه‌گیری‌های آبشستگی موجود در متون، برای برقراری مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی، استفاده شده‌اند. مدل‌های نهایی برای هر متغیر آبشستگی با فرمول‌های تجربی اخیر موجود در متون مربوط به آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، مقایسه شده‌اند. مقایسه خطاها و انحراف معیار خطا از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی با فرمول‌ها، برتری استفاده از این روش را بخوبی نشان داد.

کلمات کلیدی: سازه‌های کنترل شیب، شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل آبشستگی، پایداری سازه‌های

هیدرولیکی

Abstract

Grade-control structures prevent excessive channel bed degradation in alluvial channels, where the general bed slop is high. The local scour downstream of a grade-control structure, located on an alluvial bed is a very complex phenomenon even in terms of estimating the potential maximum erosion depth. Determination of scour location and depth is necessary to design of foundation and to prevent destruction of structure. A number of attempts have been made to relate the local scour downstream of grade-control structures with various hydraulic and morphological factors, e.g., water discharge, fall height, weir with, median bed particle size and mass density of sediments. Various investigators over a period of several decades in the past have given empirical formulas based on laboratory as well as prototype observations in order to predict the scour downstream of a grade-control structure. However, these techniques may not be adequate in view of such complex phenomenon. In this thesis the local scour downstream of a grade-control structure has been modeled using a powerful engineering tool, i.e., Artificial Neural Networks (ANNs). Four important dimensionless parameters, including: the ratio of the maximum scour depth to the height of grade control structure (s/z), the ratio of distance of maximum scour from structure to the height of structure (XS/z), the ratio of distance of maximum deposit mound to the height of structure (XD/z) and the ratio of maximum height of deposit mound to the height of structure (h_d/z) have been modeled using ANNs. The scour measurements available in the literature were used to establish the ANNs models. The final models for each scour variable parameters have been compared with the recent experimental formulations in the literature, describing the scour downstream of grade control structures. The comparison of error indexes obtained from the neural network model and corresponding experimental formula, proved the satisfactory application of the model.

Key Words: Grade-Control Structures, Artificial Neural Networks, Scour Model, Hydraulic Structures Stability.

فهرست مطالب

- ۱- مقدمه ۱
- ۲- خلاصه ۲

فصل اول: سازه‌های کنترل شیب

- ۱-۱- مقدمه ۴
- ۱-۲- سازه‌های کنترل شیب ۵
- ۱-۳- خلاصه ۸

فصل دوم: آبخستگی

- ۲-۱- مقدمه ۱۰
- ۲-۲- فرسایش و مفهوم آستانه حرکت ۱۰
- ۲-۲-۱- روش تنش بحرانی ۱۲
- ۲-۲-۱-۱- دیاگرام شیلدز ۱۲
- ۲-۲-۲- روش سرعت بحرانی ۱۴
- ۲-۲-۳- تئوری رژیم ۱۵
- ۲-۳- آبخستگی و انواع آن ۱۵
- ۲-۳-۱- کلیات ۱۵
- ۲-۳-۲- آبخستگی عمومی ۱۶
- ۲-۳-۲-۱- کاهش تراز کلی ۱۶
- ۲-۳-۲-۲- آبخستگی تنگ‌شدگی ۱۷
- ۲-۳-۲-۳- آبخستگی در خم‌ها ۱۷
- ۲-۳-۳- آبخستگی موضعی ۱۸

۱۹	۲-۳-۴- انواع آبشستگی از نظر حمل رسوب
۱۹	۲-۳-۴-۱- آبشستگی در حالت آب زلال
۱۹	۲-۳-۴-۲- آبشستگی در حالت بستر فعال
۲۰	۲-۳-۵- مراحل مختلف آبشستگی
۲۲	۲-۴- نتیجه‌گیری

فصل سوم: آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب

۲۴	۳-۱- مقدمه
۲۴	۳-۲- طرح مسأله
۲۶	۳-۳- بررسی رابطه‌ی ارائه شده توسط بورمن و ژولین
۲۶	۳-۳-۱- خصوصیات جریان پایین دست سازه‌های کنترل شیب
۲۸	۳-۳-۲- مسیر حرکت جت
۲۹	۳-۳-۳- پخشیدگی جت
۳۰	۳-۳-۴- پایداری ذره
۳۳	۳-۳-۵- آزمایش‌های بزرگ مقیاس
۴۱	۳-۳-۶- نتایج بدست آمده از تحقیق بورمن و ژولین
۴۲	۳-۴- بررسی روابط ارائه شده توسط دی‌آگوستینو و فرو
۴۲	۳-۴-۱- خودتشابهی برای پدیده‌ی آبشستگی
۴۵	۳-۴-۲- مجموعه داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای کالیبراسیون معادلات پیشنهادی
۵۱	۳-۴-۳- عمق آبشستگی بیشینه: تحلیل مجموعه داده‌ها و معادلات پیش‌بینی
۵۴	۳-۴-۴- آزمایش معادلات پیشنهاد شده برای محاسبه‌ی عمق آبشستگی بیشینه
۵۹	۳-۴-۵- موقعیت آبشستگی بیشینه
۶۰	۳-۴-۶- پشته‌تشنین شده
۶۳	۳-۴-۷- نتایج حاصل از تحقیق دی‌آگوستینو و فرو

فصل چهارم: شبکه‌های عصبی مصنوعی

۶۶	۴-۱- مقدمه
----	------------

- ۴-۲- تاریخچه شبکه‌های عصبی مصنوعی ۶۷
- ۴-۳- شبکه‌های عصبی زیستی ۶۹
- ۴-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۷۰
- ۴-۴-۱- کاربردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی ۷۱
- ۴-۴-۲- مدل ریاضی نرون ۷۲
- ۴-۴-۳- انواع توابع محرک ۷۳
- ۴-۴-۴- یادگیری شبکه عصبی مصنوعی ۷۵
- ۴-۴-۵- توقف آموزش ۷۶
- ۴-۴-۶- معرفی شبکه‌های عصبی مورد استفاده ۷۷
- ۴-۴-۷- کاربردهای شبکه MLP ۸۰
- ۴-۴-۸- نحوه عملکرد شبکه در پردازش اطلاعات ۸۰
- ۴-۴-۹- الگوریتم پس‌انتشار خطا ۸۱
- ۴-۴-۱۰- الگوریتم آموزش پرسپترون چند لایه ۸۳
- ۴-۴-۱۱- مشکلات پرسپترون چند لایه ۸۴
- ۴-۵- خلاصه ۸۵

فصل پنجم: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب

- ۵-۱- مقدمه ۸۷
- ۵-۲- کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی آبشستگی
- پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب ۸۷
- ۵-۲-۱- مجموعه داده‌های استفاده شده برای تحلیل بوسیله شبکه‌های عصبی ۸۹
- ۵-۳- پارامترهای آماری صحت‌سنجی مدل ۹۰
- ۵-۴- تحلیل شبکه‌های عصبی و نتایج حاصل ۹۱
- ۵-۴-۱- عمق آبشستگی بیشینه S ۹۱
- ۵-۴-۲- موقعیت عمق آبشستگی بیشینه XS ۹۹
- ۵-۴-۳- فاصله افقی بین تاج سرریز و تاج پشته‌ته‌نشین شده XD ۱۰۶

۵-۴-۴- ارتفاع پشته ته‌نشین شده h_d ۱۱۳

۵-۵- نتیجه‌گیری ۱۲۰

فصل ششم: نتایج و پیشنهادات

۶-۱- نتایج ۱۲۲

۶-۲- پیشنهادات ۱۲۳

۳- بخش ضمیمه ۱۲۶

۴- فهرست مراجع ۱۵۴

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) سازه کنترل شیب الوار چوبی ۶
- شکل (۲-۱) شیب‌شکن سپر فلزی ۷
- شکل (۳-۱) آستانه شیب‌دار ۸
- شکل (۱-۲) دیاگرام شیلدز برای آستانه حرکت ۱۴
- شکل (۲-۲) عمیق شدن اضافه بستر در خم رودخانه ۱۸
- شکل (۳-۲) عمق آبستگي به عنوان تابعی از زمان ۲۰
- شکل (۴-۲) توسعه فرآیند آبستگي ۲۱
- شکل (۱-۳) طرح آبستگي در بستر آبرفتی پایین دست سازه کنترل شیب ۲۵
- شکل (۲-۳) طرح آبستگي پایین دست سازه‌های کنترل شیب (بورمن و ژولین (۱۹۹۱)) ۲۷
- شکل (۳-۳) مسیر جت آزاد ۲۹
- شکل (۴-۳) طرح کانال پایه‌دار آزمایشی بزرگ مقیاس ۳۴
- شکل (۵-۳) کانال پایه‌دار در جریان کم ۳۵
- شکل (۶-۳) کانال پایه‌دار آزمایشی با عمق آبستگي تقریباً ۲ متر ۳۵
- شکل (۷-۳) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده زاویه جت β' ۳۸
- شکل (۸-۳) مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده طول پخشیدگی L_s ۳۹
- شکل (۹-۳) مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده عمق آبستگي D_s ۴۰
- شکل (۱۰-۳) طرح آبستگي بستر پایین دست سازه کنترل شیب (دی‌آگوستینو و فرو ۲۰۰۴) ۴۲
- شکل (۱۱-۳) نمایی از آبستگي در طی انجام آزمایش و رسیدن به حالت تعادل آبستگي ۴۸
- شکل (۱۲-۳) مقایسه بین عمق آبستگي نرمال شده اندازه‌گیری شده s/z و مقادیر محاسبه شده از معادله (۳۲-۳) ۵۳
- شکل (۱۳-۳) مقایسه بین عمق آبستگي نرمال شده اندازه‌گیری شده s/z و مقادیر محاسبه شده از معادله (۳۳-۳) ۵۳

- شکل (۳-۱۴) مقایسه بین مجموعه داده‌های جدول (۳-۸) تا (۳-۱۱) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از فرمول‌های (۳-۳)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) ۵۸
- شکل (۳-۱۵) مقایسه مقادیر گروه‌های بی‌بعد اندازه‌گیری شده XS/z و مقادیر محاسبه شده از معادله (۳-۳۴) ۶۰
- شکل (۳-۱۶) توزیع فراوانی پارامتر XS/s برای آزمایشات بورمن و ژولین (۱۹۹۱)، دی‌آگوستینو (۱۹۹۴)، موسی (۱۹۹۸) ۶۰
- شکل (۳-۱۷) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از معادله (۳-۳۵) برای گروه بی‌بعد XD/z ۶۱
- شکل (۳-۱۸) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از معادله (۳-۳۶) برای گروه بی‌بعد h_D/z ۶۲
- شکل (۳-۱۹) توزیع فراوانی پارامتر XD/XS برای داده‌های دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) ۶۲
- شکل (۳-۲۰) بیشترین طول تلماسه XD در مقابل بیشترین عمق آبشستگی برای داده‌های دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) ۶۳
- شکل (۴-۱) ساختمان یک نرون ۶۹
- شکل (۴-۲) مدل ریاضی نرون ۷۲
- شکل (۴-۳) تابع محرک خطی ۷۳
- شکل (۴-۴) تابع محرک محدود کننده سخت متقارن ۷۳
- شکل (۴-۵) تابع محرک سیگموئید ۷۴
- شکل (۴-۶) تابع محرک تانژانت هیپربولیک ۷۴
- شکل (۴-۷) شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) ۷۹
- شکل (۵-۱) طرح آبشستگی پایین دست سازه کنترل شیب ۸۸
- شکل (۵-۲) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی ($Epoch$) به ازای ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر s/z ۹۲
- شکل (۵-۳) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۱۰۰ چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر s/z ۹۳
- شکل (۵-۴) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر s/z برای شبکه عصبی با ۷ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون ۹۴

- شکل (۵-۵) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر s/z ۹۵
- شکل (۶-۵) مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر s/z به ازای داده‌های تست ۹۶
- شکل (۷-۵) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳-۳) برای متغیر s/z به ازای داده‌های تست ۹۶
- شکل (۸-۵) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳۲-۳) برای متغیر s/z به ازای داده‌های تست ۹۷
- شکل (۹-۵) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳۳-۳) برای متغیر s/z به ازای داده‌های تست ۹۷
- شکل (۱۰-۵) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر s/z ۹۸
- شکل (۱۱-۵) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به ازای ۵ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XS/z ۹۹
- شکل (۱۲-۵) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۳۰۰ چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XS/z ۱۰۰
- شکل (۱۳-۵) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر XS/z برای شبکه عصبی با ۵ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۳۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون ۱۰۱
- شکل (۱۴-۵) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر XS/z ۱۰۲
- شکل (۱۵-۵) مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر XS/z به ازای داده‌های تست ۱۰۳
- شکل (۱۶-۵) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳۴-۳) برای متغیر XS/z به ازای داده‌های تست ۱۰۳
- شکل (۱۷-۵) مقایسه نتایج شبکه عصبی و مقادیر محاسبه شده از رابطه (۳۴-۳) با مقادیر اندازه‌گیری شده برای متغیر XS/z ۱۰۴
- شکل (۱۸-۵) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر XS/z ۱۰۵

- شکل (۵-۱۹) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به ازای ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XD/z ۱۰۶
- شکل (۵-۲۰) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۳۰۰ چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XD/z ۱۰۷
- شکل (۵-۲۱) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر XD/z برای شبکه عصبی با ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۳۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون ۱۰۸
- شکل (۵-۲۲) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر XD/z ۱۰۹
- شکل (۵-۲۳) مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر XD/z به ازای داده‌های تست ۱۱۰
- شکل (۵-۲۴) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳-۳۵) برای متغیر XD/z به ازای داده‌های تست ۱۱۰
- شکل (۵-۲۵) مقایسه نتایج شبکه عصبی و مقادیر محاسبه شده از رابطه (۳-۳۵) با مقادیر اندازه‌گیری شده برای متغیر XD/z ۱۱۱
- شکل (۵-۲۶) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر XD/z ۱۱۲
- شکل (۵-۲۷) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به ازای ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر h_d/z ۱۱۳
- شکل (۵-۲۸) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۱۰۰ چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر h_d/z ۱۱۴
- شکل (۵-۲۹) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر h_d/z برای شبکه عصبی با ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون ۱۱۵
- شکل (۵-۳۰) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر h_d/z ۱۱۶
- شکل (۵-۳۱) مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های تست ۱۱۷
- شکل (۵-۳۲) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳-۳۶) برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های تست ۱۱۷

شکل (۳۳-۵) مقایسه نتایج شبکه عصبی و مقادیر محاسبه شده از رابطه (۳-۳۶) با مقادیر

اندازه‌گیری شده برای متغیر h_d/z ۱۱۸

شکل (۳۴-۵) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای

متغیر h_d/z ۱۱۹

فهرست جداول

۳۱	جدول (۱-۳) پارامترهای ضریب اصطکاک موضعی
۳۳	جدول (۲-۳) خلاصه معادلات آبستنگی موضعی
۳۶	جدول (۳-۳) خلاصه داده‌های آزمایشی
۴۶	جدول (۴-۳) داده‌های آزمایشگاهی ورونس (۱۹۳۷)
۴۷	جدول (۵-۳) داده‌های آزمایشگاهی موسی (۱۹۹۸)
۴۹	جدول (۶-۳) داده‌های آزمایشگاهی دی‌آگوستینو (۱۹۹۴)
	جدول (۷-۳) ماتریس همبستگی آزمایشات ورونس (۱۹۳۷)، بورمن و ژولین (۱۹۹۱)،
۵۲	دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) و موسی (۱۹۹۸)
۵۵	جدول (۸-۳) داده‌های تجربی آبراهه میسیاگا
۵۶	جدول (۹-۳) داده‌های تجربی (Falciai and Giacomini 1978)
۵۶	جدول (۱۰-۳) داده‌های تجربی لنزی و همکاران (۲۰۰۰)
۵۷	جدول (۱۱-۳) داده‌های تجربی ورونس (۱۹۳۷)، شیممی (۱۹۳۹) و ویتاکر و شیلدز (۱۹۸۴)
	جدول (۱-۵) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک
۹۳	متفاوت برای متغیر s/z
	جدول (۲-۵) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر s/z
۹۸	به ازای داده‌های تست
	جدول (۳-۵) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک
۱۰۰	متفاوت برای متغیر XS/z
	جدول (۴-۵) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر XS/z
۱۰۵	به ازای داده‌های تست
	جدول (۵-۵) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک
۱۰۷	متفاوت برای متغیر XD/z

جدول (۵-۶) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر XD/z	
به ازای داده‌های تست	۱۱۲
جدول (۵-۷) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر h_d/z	۱۱۴
جدول (۵-۸) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر h_d/z	
به ازای داده‌های تست	۱۱۹

بخش ضمیمه

جدول ۱ مجموعه داده‌های استفاده شده به عنوان پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه‌های عصبی برای همه متغیرهای $(h_d/d, XD/z, XS/z, s/z)$	۱۲۶
جدول ۲ داده‌های آموزشی همه متغیرها $(h_d/d, XD/z, XS/z, s/z)$	۱۳۱
جدول ۳ داده‌های آزمون همه متغیرها $(h_d/d, XD/z, XS/z, s/z)$	۱۳۴
جدول ۴ داده‌های تست همه متغیرها $(h_d/d, XD/z, XS/z, s/z)$	۱۳۵
جدول ۵ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر s/z به ازای داده‌های آموزش	۱۳۶
جدول ۶ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر s/z به ازای داده‌های آزمون	۱۳۹
جدول ۷ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادلات $(3-3)$ ، $(32-3)$ و $(33-3)$ به ازای داده‌های تست برای متغیر s/z	۱۴۰
جدول ۸ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XS/z به ازای داده‌های آموزش	۱۴۱
جدول ۹ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XS/z به ازای داده‌های آزمون	۱۴۳
جدول ۱۰ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادله $(3-34)$ به ازای داده‌های تست برای متغیر XS/z	۱۴۴
جدول ۱۱ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XD/z به ازای داده‌های آموزش	۱۴۵

- جدول ۱۲ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XD/z به ازای داده‌های آزمون ۱۴۷
- جدول ۱۳ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادله (۳-۳۵) به ازای داده‌های تست برای متغیر XD/z ۱۴۸
- جدول ۱۴ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های آموزش ۱۴۹
- جدول ۱۵ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های آزمون ۱۵۱
- جدول ۱۶ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادله (۳-۳۶) به ازای داده‌های تست برای متغیر h_d/z ۱۵۲

۱- مقدمه

سازه‌های کنترل شیب، از کاهش تراز اضافی بستر در کانال‌های آبرفتی که شیب زیادی دارند، جلوگیری می‌کنند. آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب در بسترهای آبرفتی، پدیده پیچیده‌ای بر حسب تخمین عمق فرسایش بیشینه می‌باشد. تعیین موقعیت و عمق آبشستگی، برای طراحی فونداسیون و جلوگیری از تخریب سازه ضروری می‌باشد. طراحی مناسب سازه‌های کنترل شیب، مستلزم تخمین درست آبشستگی پایین‌دست می‌باشد.

مهندسين هیدرولیک تلاش‌های زیادی برای ارتباط آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب به فاکتورهای مختلف هیدرولیکی و مورفولوژیکی مثل دبی، ارتفاع ریزش، عرض سرریز، اندازه متوسط ذرات بستر و دانسیته جرمی رسوبات انجام داده‌اند. محققین مختلفی در طی چند دهه گذشته، فرمول‌هایی تجربی مبتنی بر آزمایش و نیز مشاهدات نمونه اصلی، به منظور پیش‌بینی آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، ارائه کرده‌اند.

در سالیان اخیر، شاهد حرکت مستمری از تحقیقات صرفاً نظری به تحقیقات کاربردی بخصوص در زمینه پردازش اطلاعات، برای مسائلی که برای آنها راه‌حلی موجود نیست و یا براحتی قابل حل نیستند هستیم. تأثیر پارامترهای بسیار زیاد در برخی فرآیندهای فیزیکی و وجود روابط کاملاً غیرخطی میان آنها، بر پیچیدگی کار می‌افزاید. از جمله این مسائل روش‌هایی است که برای تخمین آبشستگی به کار می‌روند. شبکه‌های عصبی مصنوعی (*ANNs*)، جزء سیستم‌های دینامیکی قرار دارند، که با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش نهفته یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار منتقل می‌کنند.

در این پایان‌نامه، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای مهندسی،

برای پیش‌بینی آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، استفاده شده است.

۲- خلاصه

خلاصه‌ای از فصول ارائه شده در این پایان‌نامه، بصورت زیر می‌باشد.

در فصل اول، سازه‌های کنترل شیب معرفی می‌شوند. از انواع متداول سازه‌های کنترل شیب، سرریزهای قائم بتنی، چوبی و سرریزهای سپری فولادی، آستانه‌های شیب‌دار پاره‌سنگی و خاک - سیمان و شیب‌شکن‌های توری‌سنگی معرفی می‌شوند.

در فصل دوم، کلیاتی درباره فرآیندهای فرسایش و آستانه حرکت ذرات بیان می‌شود. به سه روش مهم و عمده برای بدست آوردن روابط هیدرولیکی در زمان شروع حرکت ذرات اشاره می‌شود. در این فصل با پدیده آبشستگی و مفاهیم اولیه آن آشنا می‌شویم. انواع آبشستگی از جهات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه مراحل مختلف آبشستگی بررسی می‌شود.

در فصل سوم، تحقیقات تجربی در خصوص آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب و روابط ارائه شده توسط محققین مختلف مرور شده است. دو تحقیق مهم در این موضوع در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۴ با جزئیات کامل بررسی می‌شوند.

در فصل چهارم، با شبکه‌های عصبی آشنا می‌شویم. در ابتدا خلاصه‌ای از نحوه عملکرد شبکه‌های عصبی زیستی ارائه می‌شود. در ادامه به ویژگی‌های مشترک شبکه‌های عصبی زیستی و مصنوعی اشاره می‌شود. سپس مدل ریاضی نرون و انواع توابع محرک متداول مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه فرآیند یادگیری شبکه‌های عصبی و انواع روش‌های آموزش شبکه بررسی می‌شوند. شبکه‌های عصبی مورد استفاده از جمله شبکه پرسپترون و شبکه پرسپترون چند لایه (*MLP*) و کاربردهای آنها تشریح می‌شوند. الگوریتم پس‌انتشار خطا و الگوریتم شبکه پرسپترون چند لایه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در فصل پنجم، از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل استفاده می‌شود. در ابتدا داده‌هایی که به عنوان ورودی به شبکه مورد استفاده قرار خواهند گرفت، مشخص می‌شوند. سپس با آزمون و خطا مدل‌های مناسب شبکه عصبی برای هر متغیر آبشستگی بدست می‌آید. در ادامه نتایج مدل‌های شبکه عصبی با نتایج روابط مختلف متغیرهای آبشستگی مقایسه می‌شوند.

در فصل ششم، خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده از پایان‌نامه ارائه می‌شود. همچنین مواردی که در

آینده می‌تواند مورد مطالعه بیشتر قرار گیرند، پیشنهاد می‌شود.

فصل اول

سازه‌های کنترل شیب

۱-۱- مقدمه

یکی از مهمترین مسائلی که امروزه مهندسين رودخانه با آن مواجه هستند، تثبيت پديده کاهش تراز^۱ رودخانه‌ها می‌باشد. پديده کاهش تراز، به زيرساخت‌های^۲ واقع در حریم رودخانه^۳ و به محیط زیست، خسارت وارد می‌کند. بطور کلی حفاظت ساحل در درازمدت بی‌اثر خواهد بود و احتمالاً در صورتی که کاهش تراز کانال ادامه پیدا کند، باعث اتلاف منابع خواهد شد. در سیستم‌های کانالی، تنوع وسیعی از انواع سازه‌ها برای تأمین کنترل شیب بکار گرفته می‌شود. در این فصل برخی انواع متداولتر سازه‌های کنترل شیب توصیف می‌شوند.

کنترل شیب، مؤلفه‌ای ضروری برای تثبيت جریان‌های کاهنده تراز می‌باشد. کاهش تراز کانال به پل‌ها، آبروها^۴، خطوط انتقال پتروشیمی، خطوط نیرو، خطوط آب و فاضلاب و دیگر زيرساخت‌ها، خسارت وارد می‌کند. کاهش تراز کانال، باعث شیب و ارتفاع فوق‌العاده زیاد سواحل می‌شود که اغلب به شکست آنها می‌انجامد. عریض کردن^۵ کانال و فرسایش سواحل، باعث اتلاف شدید زمین و خسارت به زيرساخت‌های ساحلی رودخانه و زیستگاه^۶ می‌شود. هنگامی که کاهش تراز کانال ادامه پیدا کند، سطح آب زیرزمینی در طول آبراهه پایین می‌افتد و بر گیاهان ساحلی رودخانه اثر می‌گذارد. رسوبات فرسایش یافته از کاهش تراز کانال‌ها به پایین دست منتقل می‌شوند و به طور نامطلوبی کانال‌های کنترل سیل، مناطق مخزنی و زیستگاه‌های تالابی^۷ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین این رسوبات مقادیر قابل توجهی مواد مغذی مخصوصاً فسفر را حمل می‌کنند، که کیفیت آب و زیستگاه را در طول سیستم آبراهه پایین می‌آورند [1].

هنگامی که کاهش تراز کانال کاملاً سیستماتیک وجود داشته باشد، معمولاً طرح عملیاتی جامع، مورد نیاز می‌باشد. معمولاً این طرح عملیات، شامل استفاده از یک یا چند سازه کنترل شیب، برای جلوگیری از فرآیند کاهش تراز می‌شود. در گسترده‌ترین مفهوم، عبارت کنترل شیب می‌تواند برای هر

-
- 1 - Degradation
 - 2 - Infrastructures
 - 3 - Riparian
 - 4 - Culverts
 - 5 - Widening
 - 6 - Habitat
 - 7 - Wetland

تغییر در حوزه آبریز^۱ که پایداری بستر جریان را فراهم می‌کند، بکار رود. این موضوع، شامل تنظیم مجدد مسیر آبراهه می‌شود. متداول‌ترین روش کنترل شیب، ساخت سازه‌های کنترل شیب در داخل کانال می‌باشد. بطور کلی سازه‌های کنترل شیب متنوعی در کانال‌ها استفاده می‌شوند که شامل استفاده از سازه‌های سنگی غیرمتراکم^۲ ساده تا سرریزهای بتن مسلح می‌شوند و در مقیاس، از آبراهه‌های کوچک تا رودخانه‌های بزرگ تغییر می‌کنند [1].

اثرات محیطی مثبت و منفی همراه با سازه‌های کنترل شیب وجود دارد. جدی‌ترین تأثیر منفی محیطی معمول سازه‌های کنترل شیب، انسداد مسیر عبور ماهی‌ها می‌باشد. در طرف مثبت، سازه‌های کنترل شیب باعث بهبود پایداری کانال و کاهش شیب رودخانه و سرعت جریان می‌شوند [1].

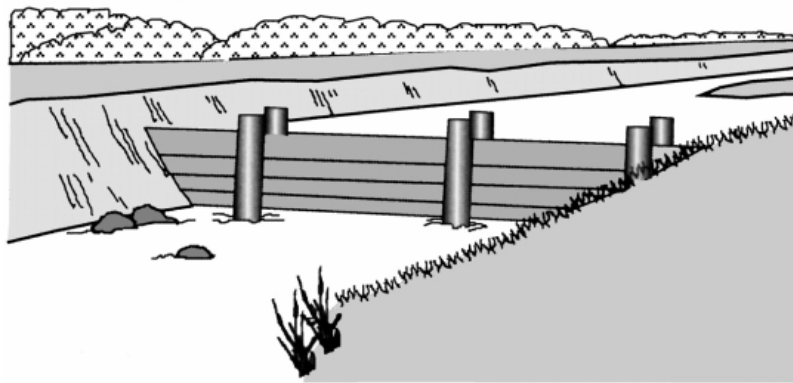
۱-۲- سازه‌های کنترل شیب [۲]

سازه‌های کنترل شیب^۳ یا شیب‌شکن‌ها^۴، جهت کاهش شیب کانال احداث می‌شوند. هدف از ساخت سازه‌های کنترل شیب، پایدار کردن سواحل و بستر کانال با کاهش شیب رودخانه و سرعت جریان است. با افزایش اندازه رودخانه، بازده یک سازه کنترل شیب کاهش پیدا می‌کند. سرریزهای قائم بتنی، چوبی و سرریزهای سپری فولادی^۵، آستانه‌های شیب‌دار پاره‌سنگی^۶ و خاک - سیمان^۷ یا شیب‌شکن‌های توری‌سنگی^۸ پس از در نظر گرفتن پایداری سازه و عمق چاله آبستگي در پنجه سازه طراحی می‌شوند. در طراحی شیب‌شکن‌ها باید اثرات اتلاف انرژی^۹ و حفاظت از بستر و ساحل در بالا و پایین دست سازه را در نظر گرفت. معمولاً حفاظت مقاطع ورودی سازه، با پوشش سنگریز انجام می‌شود. پوشش پاره‌سنگی در فرونشاندن اغتشاش باقیمانده در حوضچه آرامش^{۱۰} و حفاظت بستر و مواد ساحل از حمله مستقیم آب مؤثر است. در جاهای مناسب از فیلتر نیز استفاده می‌شود.

شیب‌شکن‌های ساخته شده از قطعات و الوارهای چوبی در رودخانه‌های خیلی کوچک و خندق‌های صحرايي کارساز است (شکل (۱-۱)). سازه‌های کنترل شیب لوله‌ای موجدار از آبرویی ساخته شده است

- 1 - Watershed
- 2 - Loose
- 3 - Grade-control structures
- 4 - Drops
- 5 - Sheet pile weirs
- 6 - Riprap sloping sills
- 7 - Soil-cement
- 8 - Gabion drop structures
- 9 - Energy dissipation
- 10 - Stilling basin

که به طور قائم در کف رودخانه، بسته به عرض بستر، رانده یا دفن می‌شود. داخل لوله و همچنین تا فاصله کوتاهی از پایین دست سازه، جهت جلوگیری از آبستگی با پاره‌سنگ پوشش می‌شود. دیواره جانبی پایین دست مقطع آبرو هم تراز با بستر تنظیم می‌شود. این سازه‌ها در شیب‌شکن‌های کوچک مؤثر هستند و از مجموعه آنها می‌توان جهت کنترل شیب در رودخانه‌های با شیب نسبتاً تند در فاصله طولانی استفاده کرد.



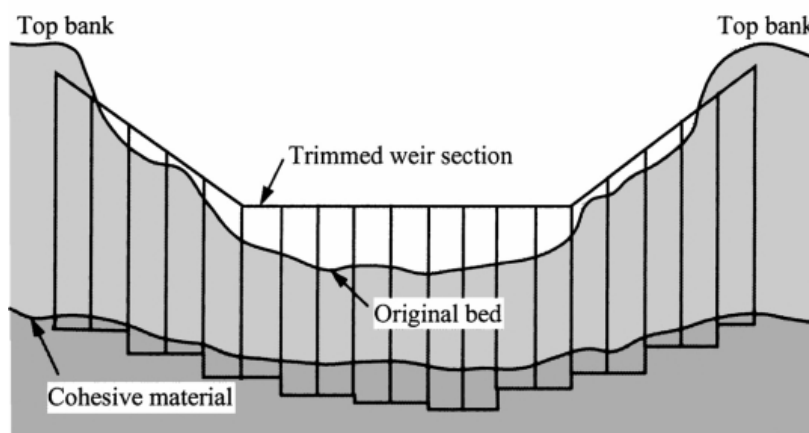
شکل (۱-۱) سازه کنترل شیب الوار چوبی [۲]

توری‌سنگ‌ها در ساختن سرریز یا شیب‌شکن در مناطقی که پرکننده کافی وجود داشته باشد، کارایی دارند. سبد توری‌سنگ شکل‌پذیر است، زیرا که می‌توان از آن در یک مجموعه و یا به تنهایی برای شیب‌شکن‌هایی با ارتفاع‌های مختلف استفاده کرد. توری‌سنگ‌ها همچنین برای حفاظت سواحل ورودی به شیب‌شکن و یا ساخت حوضچه آرامش به کار برده می‌شوند. در ساخت شیب‌شکن‌های بزرگ از بتن به دلیل دوام آن استفاده می‌شود. طراحی حوضچه‌های آرامش بتنی بسیار متنوع است.

در میان سازه‌های کنترل شیب بیشتر از همه، از سرریزها استفاده می‌شود. این امر به دلیل سادگی در طراحی و ساخت، هزینه پایین در بسیاری از موارد، کاربردهای متنوع و تطابق آنها با سایر اهداف است. ساده‌ترین انواع سرریزها، سپری‌هایی است که با صفحات فلزی ساخته می‌شوند. در حقیقت سپرکوبی هم به عنوان مقطع کنترل و هم دیواره آب‌بند^۱ عمل می‌کند. برای ساخت این نوع سرریزها، سپرهای فلزی را تا عمق دو تا سه برابر حداکثر عمق پیش‌بینی شده آبستگی و یا عمق ممکن برای سپرکوبی در خاک می‌رانند و مقطع آن را تقریباً مطابق رودخانه در محل در می‌آورند (شکل (۱-۲)). در صورتی که ارتفاع

1 - Cutoff wall

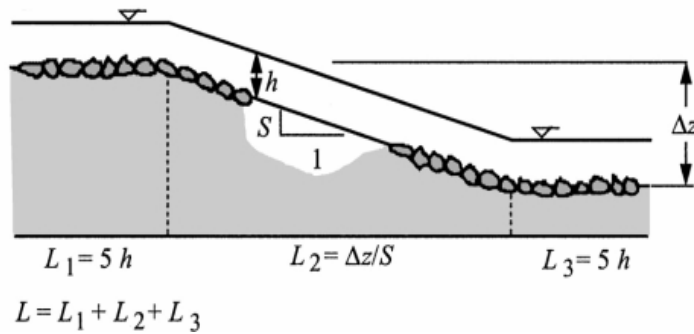
سواحل زیاد باشد، سرریز سپری باید از هر دو طرف به ساحل بسته شود. حفاظت به کمک پوشش سنگریز در بالا و پایین دست این نوع سرریز توصیه می‌شود. سرریزهای سپری بویژه در کانال‌های عریضی که سازه‌های بتنی یا پاره‌سنگی طویل، بسیار گران در می‌آید توصیه می‌شود. سپری‌ها را می‌توان مطابق با تراز بستر طبیعی کانال و یا کمی بالاتر تنظیم کرد. در این صورت پس از رسوبگذاری، بستر کانال در پشت سرریز بالا می‌آید و شیب خط انرژی در آن محدوده کاهش پیدا می‌کند. در رودخانه‌هایی که کاهش انرژی در فواصل بیشتر ضروری است، از سرریزهای متوالی استفاده می‌شود.



شکل (۱-۲) شیب‌شکن سپر فلزی [۲]

سرریزهای لبه پهن^۱، آستانه‌های شیب‌دار یا سرریزهای پاره‌سنگی^۲ سازه‌هایی هستند که با جایگذاری توده‌ای از پاره‌سنگ در کف رودخانه تشکیل می‌شوند (شکل (۱-۳)). حجم سنگ لازم، بسته به میزان آبشستگی مورد انتظار در پایین دست سرریز ناشی از اغتشاش یا مهاجرت پیشانی خندق^۳، تعیین می‌شود. روش‌های مختلف محاسبه عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب در فصل سوم بررسی می‌شوند.

- 1 - Broad crested weirs
- 2 - Rockfill weirs
- 3 - Headcut



شکل (۱-۳) آستانه شیب‌دار [۲]

۱-۳- خلاصه

سازه‌های کنترل شیب باعث بهبود پایداری کانال و کاهش شیب رودخانه و سرعت جریان می‌شود. هدف از ساخت سازه‌های کنترل شیب، پایدار کردن سواحل و بستر کانال با کاهش شیب رودخانه و سرعت جریان است. متداول‌ترین انواع سازه‌های کنترل شیب، سرریزهای قائم بتنی، چوبی و سرریزهای سپری فولادی، آستانه‌های شیب‌دار پاره‌سنگی و خاک - سیمان یا شیب‌شکن‌های توری‌سنگی می‌باشند. شیب‌شکن‌های ساخته شده از قطعات و الوارهای چوبی در رودخانه‌های خیلی کوچک و خندق‌های صحرایی مؤثر هستند. توری‌سنگ‌ها در ساختن سرریز یا شیب‌شکن در مناطقی که پرکننده کافی وجود داشته باشد، کارایی دارند. در میان سازه‌های کنترل شیب بیشتر از همه، از سرریزها استفاده می‌شود. این امر به دلیل سادگی در طراحی و ساخت، هزینه پایین در بسیاری از موارد، کاربردهای متنوع و تطابق آنها با سایر اهداف است. ساده‌ترین انواع سرریزها، سپری‌هایی است که با صفحات فلزی ساخته می‌شوند.

فصل دوم

آبشستگی

۲-۱- مقدمه

بحث آبخستگی در علم هیدرولیک قدمتی طولانی دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و همچنین به دلیل نبودن روابطی قوی که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، همچنان مورد توجه خاص محققین علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه قرار دارد.

از آنجا که حفاظت کامل بستر در مقابل این پدیده گران تمام می‌شود و حتی با صرف هزینه‌های زیاد هم امکان حفاظت کامل وجود ندارد، لذا لازم است دامنه گسترش این پدیده، برای طراحان سازه‌های هیدرولیکی شناخته شده باشد.

در اثر آبخستگی، بستر رودخانه فرسایش یافته و گود می‌شود. این مسأله ممکن است، برای سازه مجاور مخاطرات جدی همراه داشته باشد. از این رو لازم است تا مهندسين هیدرولیک، با مکانیزم عمل آبخستگی آشنا شوند. بخصوص در طراحی دیواره‌های حفاظتی رودخانه‌ها، آبگیرها، پایین‌دست حوضچه‌های آرامش، پایه پل‌ها، پایین‌دست سرریزهای آبشاری و سازه‌های کنترل شیب، پیش‌بینی عمق آبخستگی بسیار ضروری می‌باشد. در این فصل، کلیاتی درباره فرآیندهای فرسایش، تعریف آبخستگی، مکانیزم عمل آبخستگی و انواع آبخستگی از جهات مختلف، بحث و بررسی می‌شوند.

۲-۲- فرسایش^۱ و مفهوم آستانه حرکت^۲

فرسایش در حقیقت جابجایی ذرات همراه جریان از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری به علت شدت انرژی سیال می‌باشد. معمولاً آبخستگی، شامل یک چاله در ابتدای پروفیل خود و یک بالا آمدگی در آخر پروفیل است.

مانند هر حرکت فیزیکی دیگر، این حرکت بستر نیز شامل دو گروه از نیروها می‌باشد:

- ۱- گروهی از نیروها که در مقابل حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی آن ذره می‌شوند.
- ۲- گروهی از نیروها که سعی در جدا کردن ذره از بستر داشته و می‌خواهند آن را همراه جریان حرکت دهند.

1 - Erosion

2 - Incipient motion

فرآیند آبشستگی به طور عادی، در بستر رودخانه و دیواره‌های آن رخ می‌دهد اما حالت بسیار بحرانی، معمولاً پس از عبور جریان از کنار یک سازه هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. حرکت یک ذره موقعی شروع می‌شود که نیروهای اعمال شده توسط جریان سیال یعنی نیروی کشسانی و بالابر که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروهای مقاوم به علت وزن ذره، غالب آیند (آستانه حرکت ذره). نیروهای بالابر ذکر شده به دو دلیل ممکن است ایجاد شوند:

اولاً، به خاطر تغییرات سرعت در نزدیکی کف کانال و ایجاد یک اختلاف فشار بین بالا و پایین ذره، که آن را از جا می‌کند و این ذره، توسط سیال به محل دیگری حمل می‌شود. ثانیاً، به علت وجود جریان آشفته (جریان متلاطم موضعی)، ممکن است سیال، ذره را نیز با خود حمل کند. اگر نیروی وزن و نیروی بالابر تقریباً مساوی باشند، یک نیروی پیش‌بر کوچک قادر است تا ذره را از جای خود حرکت دهد. پس از جابجایی ذره، نیروی بالابر رو به کاهش می‌گذارد و نیروی پیش‌بر اضافه می‌شود. بحث آستانه حرکت در مطالعات انتقال رسوب، طراحی کانال‌های غیرفرسایشی و مطالعه چگونگی رسوبگذاری و فرسایش در آبراهه‌ها اهمیت فراوان دارد. با توجه به تصادفی بودن طبیعت حرکت رسوب در طول بستر رسوبی، تعیین اینکه در چه شرایطی از جریان، ذرات رسوبی شروع به حرکت می‌کنند، دشوار است. در نتیجه، معیار آستانه حرکت، کم و بیش به دیدگاه محقق بستگی دارد. محققین مختلف، این معیار را با عناوین متعددی از قبیل حرکت اولیه^۱، حرکت چند ذره‌ای^۲، حرکت ضعیف^۳ و حرکت بحرانی^۴، ذکر کرده‌اند. اگرچه علی‌رغم اختلاف سلیقه در تعیین معیار آستانه حرکت، تمامی محققین از روش واحدی در تحقیقات تئوری و عملی بهره گرفته‌اند.

در مجموع اگر دنبال تعریف خاصی برای آستانه حرکت باشیم، شاید تعریف زیر بهترین باشد:

"فرسایش از آستانه حرکت شروع شده و عبارت است از لحظه‌ای که حرکت دانه‌ها پس از آن مداومت می‌یابد. این حرکت منجر به جابجایی ذره، حداقل در یک بعد گردیده و ذره متحرک نهایتاً به جای خود بر نمی‌گردد." [۳]

برای بدست آوردن روابط هیدرولیکی در زمان شروع حرکت ذره، روش‌های متعددی ارائه شده است که سه روش مهم و عمده عبارتند از:

- 1 - Initial motion
- 2 - Several grain moving
- 3 - Weak movement
- 4 - Critical movement

الف - روش تنش بحرانی

ب - روش سرعت بحرانی

ج - تئوری رژیم

۲-۲-۱- روش تنش بحرانی

در روش اول وقتی که تنش برشی وارده بر ذرات بیشتر از تنش برشی بحرانی باشد، ذرات شروع به حرکت می‌کنند. بعضی از روش‌های ارائه شده در این زمینه عبارتند از [۴]:

۱- دیاگرام شیلدز^۱

۲- دیاگرام گسلر^۲ (روش اصلاح شده شیلدز)

۳- تئوری وایت^۳

۴- روش کالینسکی^۴

۵- روش تجربی لین و کارلسن^۵

۲-۲-۱-۱- دیاگرام شیلدز [۴]

شیلدز در سال ۱۹۳۶ اولین کسی بود که مطالعات بنیادی برای یافتن رابطه‌ای در آستانه حرکت ذرات، انجام داد. او پس از انجام آزمایشات متعدد، شروع حرکت ذرات کروی یکنواخت را وابسته به عوامل زیر تشخیص داد:

اندازه ذره d_s ، لزجت مایع μ ، جرم مخصوص مایع ρ ، وزن مخصوص ذره γ_s ، تنش برشی جریان در آستانه حرکت τ_c (تنش برشی بحرانی):

$$F_1 = (\tau_c, \rho, \mu, d_s, \gamma_s, g) = 0 \quad (1-2)$$

این رابطه با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری باکینگهام به رابطه بدون بعدی، به صورت زیر تغییر می‌یابد:

-
- 1 - Shields
 - 2 - Gessler
 - 3 - White
 - 4 - Kalinske
 - 5 - Lane and Carlson

$$F_2 = \left(\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_s}, \frac{u_* d_s}{\nu} \right) = 0 \quad (2-2)$$

پارامتر بی بعد $\tau_* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_s}$ ، را پارامتر شیلدز بحرانی^۱ می نامند که τ_c از رابطه زیر بدست می آید:

$$\tau_c = \gamma R S \quad (3-2)$$

γ وزن مخصوص آب، R شعاع هیدرولیکی مقطع و S شیب کانال می باشد.

پارامتر بی بعد $\frac{u_* d_s}{\nu}$ را با Re_* نمایش می دهند و به آن رینولدز مرزی (برشی) می نامند. که u_* از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$u_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (4-2)$$

R شعاع هیدرولیکی مقطع، S شیب کانال و ν لزجت سینماتیکی می باشد.

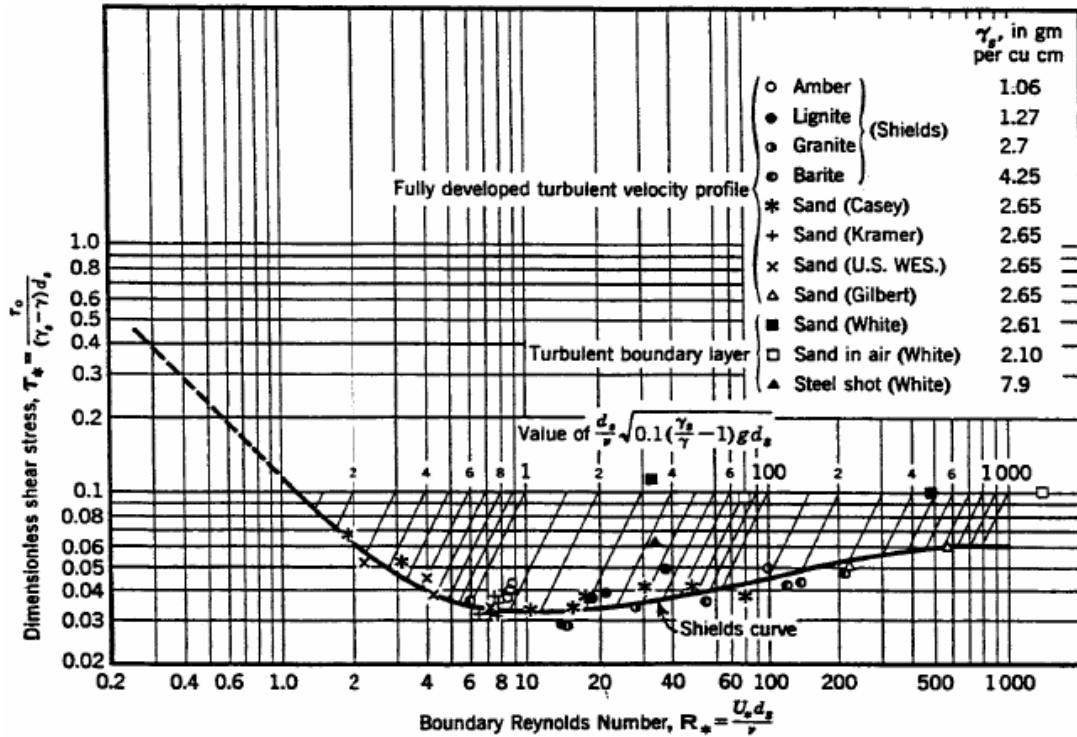
رابطه بین این دو پارامتر بی بعد بطور تجربی تعیین می شود. نمودار (۱-۲) نتایج تجربی بدست آمده از تحقیقات شیلدز را در بدست آوردن ارتباط بین این دو پارامتر و آستانه حرکت ذره نشان می دهد. هرگاه این دو پارامتر، برای یک شرایط جریان و بستر یکسان، نشانگر نقطه ای در بالای منحنی باشند، ذره رسوبی حرکت خواهد کرد و بالعکس در مورد نقاط پایین منحنی، جریان آب قادر به حرکت دادن ذره رسوبی نیست. با توجه به نمودار شیلدز، جریان را می توان به سه منطقه تقسیم بندی کرد:

۱- منطقه جریان با بستر صاف، یعنی وقتی $Re_* < 5$ باشد، در این صورت پارامتر شیلدز تابعی از عدد رینولدز مرزی است بدین معنی که در این شرایط لزجت مایع روی حرکت ذرات تأثیر دارد.

۲- منطقه بینابینی (انتقالی) موقعی که $5 < Re_* < 400$

۳- منطقه جریان با بستر زبر که $Re_* > 400$ در این منطقه نیروی لزجت، تأثیری روی حرکت ذرات ندارد و پارامتر شیلدز عدد ثابتی می باشد که برابر است با:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_s} = 0.056 \quad (5-2)$$



شکل (۱-۲) دیاگرام شیلدز برای آستانه حرکت (Vanoni 1975) [5]

۲-۲-۲-۲- روش سرعت بحرانی [۴]

در روش دوم، دانشمندان علم هیدرولیک به جای استفاده از تنش برشی، سرعت جریان را به عنوان مهمترین فاکتور در فرموله کردن آستانه حرکت به کار برده‌اند. روابط ارائه شده، عمدتاً بر مبنای تجزیه و تحلیل، آنالیز ابعادی و استفاده از داده‌های تجربی بوده است. در این روش محققین بسیاری با استفاده از روش‌های مختلف، فرمول‌هایی را ارائه کرده‌اند. گروهی دیگر مقادیر سرعت‌های مجاز را در انواع کانال‌های آبرفتی اندازه‌گیری کرده‌اند و به صورت جدول‌هایی ارائه کرده‌اند.

شفاعی بجزستان^۱ در سال ۱۹۹۱ پس از جمع‌آوری داده‌های زیادی از منابع مختلف، فرمول زیر را بر اساس سرعت بحرانی ارائه کرده است:

$$\frac{V}{[g(\rho_s/\rho - 1)d_s]^{0.5}} = 2.2 \quad \frac{d_s}{d} < 0.1$$

$$\frac{V}{[g(\rho_s/\rho - 1)d_s]^{0.5}} = 1.252 \left(\frac{d}{d_s}\right)^{0.25} \quad \frac{d_s}{d} > 0.1 \quad (۶-۲)$$

V سرعت بحرانی در کانال و d عمق آب در کانال می‌باشد.

۲-۲-۳- تئوری رژیم^۱

تئوری رژیم، یک روش تجربی است که توسط کندی پس از مطالعه کانال‌های آبیاری هند و پاکستان به وجود آمد. یک کانال و یا یک رودخانه، زمانی در حالت رژیم است که شیب و سطح مقطع آن در شرایط تعادل قرار داشته باشد، یعنی اینکه، فرسایش و یا رسوب‌گذاری نداشته باشد. هر چند که حمل رسوبات همراه جریان آب، ممکن است وجود داشته باشد. چنین حالتی را اصطلاحاً بستر زنده^۲ می‌نامند و معمولاً در کانال‌های آبرفتی شنی مشاهده می‌شود. مبانی این تئوری مبتنی بر معادلات ساده و تجربی می‌باشد که با استفاده از اطلاعات صحرایی جمع‌آوری شده از رودخانه‌ها و یا کانال‌های مصنوعی، در حالت تعادل بدست آمده است. کندی عقیده داشت که در کانال‌های در حالت رژیم، بین سرعت V و عمق جریان d ، رابطه‌ای بصورت زیر برقرار می‌باشد [۴]:

$$V = Kd^n \quad (۷-۲)$$

K و n ضرایب ثابت می‌باشند. بعدها لیبسی، روابط مشخص‌تری به صورت زیر پیشنهاد کرد [۶].

$$f = 1.6\sqrt{d_s} \quad (۸-۲)$$

$$P = 4.75Q^{0.5} \quad (۹-۲)$$

$$R = 0.47\left(\frac{Q}{f}\right)^{1/3} \quad (۱۰-۲)$$

$$V = \left(\frac{f^2 Q}{140}\right)^{1/6} \quad (۱۱-۲)$$

$$S = \frac{f^{5/3}}{3340Q^{1/6}} \quad (۱۲-۲)$$

f : ضریب لای لیبسی، d_s : اندازه رسوب (mm)، P : پیرامون مرطوب (m)، Q : دبی (m^3/s)، R : شعاع هیدرولیکی (m)، V : سرعت متوسط (m/s) و S : شیب کانال می‌باشد [۶].

۲-۳- آبشستگی و انواع آن

۲-۳-۱- کلیات

سازه‌های هیدرولیکی که الگوی جریان را در مجاورت یک سازه مسدود می‌کنند، باعث فرسایش موضعی یا آبشستگی می‌شوند. تغییر خصوصیات جریان (سرعت و یا اغتشاش)، منجر به تغییر در ظرفیت

1 - Regime theory
2 - Live bed

انتقال رسوب و عدم توازن موضعی بین انتقال رسوب واقعی و ظرفیت حمل جریان می‌شود. حالت تعادل جدید، هنگامی بدست می‌آید که شرایط هیدرولیکی در خلال آبشستگی تعدیل شود. آبشستگی که ممکن است در یک سازه اتفاق بیافتد، به آبشستگی عمومی^۱ و آبشستگی موضعی^۲ تقسیم می‌شود. در این فرآیندها، مقیاس‌های زمانی و طولی، متفاوت هستند. بعنوان یک تقریب اولیه، برای بدست آوردن آبشستگی حاصل، آبشستگی ایجاد شده بوسیله هر فرآیند جداگانه، به صورت خطی جمع می‌شود. بعلاوه، آبشستگی در شرایط مختلف انتقال رسوب، متفاوت است [7].

۲-۳-۲- آبشستگی عمومی

بطور کلی، مقیاس زمانی آبشستگی عمومی، طولانی‌تر از مقیاس زمانی آبشستگی موضعی می‌باشد. مثال‌های معمول آبشستگی عمومی، تغییر طولانی در تراز بستر رودخانه، آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی^۳، آبشستگی در خم‌ها^۴ و آبشستگی در چندآب‌ها^۵ می‌باشند [7].

۲-۳-۲-۱- کاهش تراز کلی^۶

کاهش تراز کلی، از تغییر شرایط رژیم پایدار رودخانه‌ای که تعدیل شده است، حاصل می‌شود. این پدیده، نتیجه تغییرات جریان آب یا رسوبات رودخانه می‌باشد. بعضی مثال‌های عوارض زمین^۷، که حاصل دخالت انسان و یا تغییرات طبیعی، که به رژیم جریان واکنش نشان می‌دهند، عبارتند از [7]:

- خاکریزهای سیلاب^۸، حوضچه‌های تأخیری سیلاب^۹، سرریزها
- طرح‌های بهبود کانال شامل لایروبی^{۱۰}، زدودن علف‌های هرز، استخراج شن و ماسه از رودخانه
- تغییر در الگوهای آب (چندآب یا انشعاب کانال‌های رودخانه)
- طرح‌های انتقال آب بین حوزه‌های رودخانه
- میانبر در پیچ و خم‌ها^{۱۱}

-
- 1 - General scour
 - 2 - Local scour
 - 3 - Constriction scour
 - 4 - Bends
 - 5 - Confluences
 - 6 - Overall degradation
 - 7 - Features
 - 8 - Flood embankments
 - 9 - Flood detention basins
 - 10 - Dredging
 - 11 - Meander cut-offs

به عنوان مثال، نتیجه کاهش تراز کلی در محل پل، کاهش تراز بستر خواهد بود، که باعث به خطر افتادن فونداسیون‌ها می‌شود. اگر چه کاهش تراز، خطر آبشستگی را افزایش می‌دهد، در بعضی موارد افزایش تراز ممکن است اتفاق بیافتد. این مورد باعث افزایش تراز آب خواهد شد، و خطر آبشستگی را کاهش می‌دهد. فرآیند کاهش تراز که در حال پیشرفت می‌باشد، باید بعنوان احتمال کاهش تراز تحمیلی در آینده (کاهش تراز فصلی) در نظر گرفته شود. کاهش تراز کلی، روی مسیری طولانی از رودخانه اثر می‌کند، و روی کیلومترها و در سال‌های زیادی، امتداد پیدا می‌کند. برای بعضی شرایط، اطلاعات تغییرات محتمل بستر رودخانه، می‌تواند از یک مدل مورفولوژیکی یک بعدی بدست آید [7].

۲-۳-۲- آبشستگی تنگ‌شدگی

این نوع آبشستگی، ناشی از افزایش سرعت جریان در تنگ‌شدگی‌های رودخانه می‌باشد. در نتیجه به ظرفیت حمل رسوب افزوده شده و سبب خواهد شد تا بستر رودخانه در این محل، فرسایش یابد. عمل فرسایش معمولاً ادامه خواهد داشت تا اینکه، سطح مقطع جریان آنقدر افزایش یابد تا ظرفیت حمل رسوب کاهش یافته و برابر با ظرفیت حمل رسوب در مقاطع بالادست محل تنگ‌شدگی گردد. در این حالت فرسایش در این محل متوقف می‌گردد. هرچند این فرسایش، موجب کاهش تأثیر پس‌زدگی آب در بالادست می‌شود. برای محاسبه میزان آبشستگی تنگ‌شدگی، می‌توان از دو روش زیر استفاده کرد [4]:

الف - استفاده از معادله حاکم بر حرکت رسوب

ب - استفاده از تئوری استراب

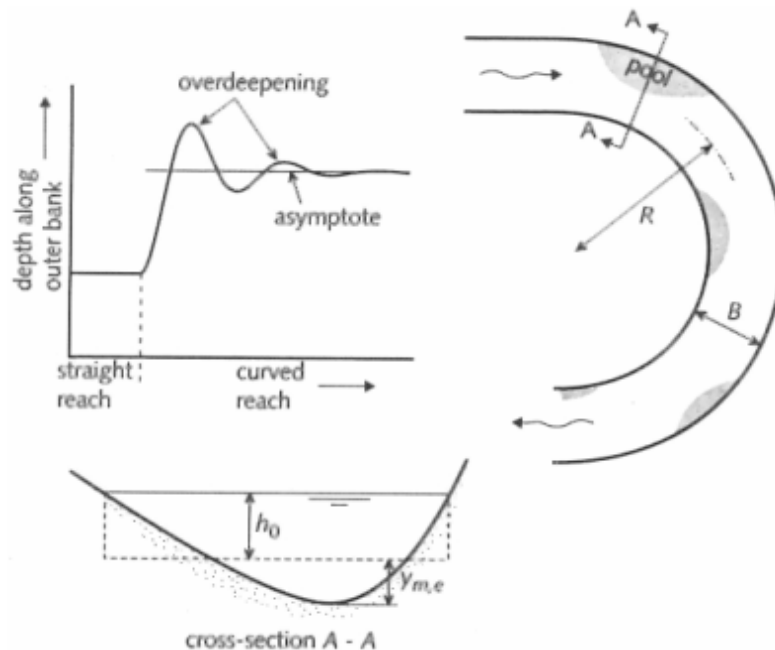
۲-۳-۳- آبشستگی در خم‌ها

به طور کلی، آبشستگی در خم‌ها وابسته به پارامترهای محلی از قبیل انحناء خم، عمق جریان و اندازه ذرات و تأثیرات بالادست، مثل توزیع مجدد جریان و انتقال رسوب می‌باشد. در قسمت خارجی خم‌ها، آبشستگی اضافی در نتیجه جریان حلزونی^۱، اتفاق می‌افتد. استروکسما و همکاران (*Struiksma et al, 1985*) به نقل از مرجع (۷) نشان دادند که آبشستگی اضافی در خم ناشی از جریان حلزونی و پدیده اضافه جهش^۲ می‌باشد (شکل (۲-۲)) بزرگی این اضافه جهش، شدیداً به نسبت عرض به عمق، وابسته است و اضافه جهش با افزایش این نسبت زیاد می‌شود. به علت اثر این اضافه جهش، فرموله

1 - Spiral flow

2 - Overshoot

کردن رابطه پیش‌بینی آبشستگی خم، مشکل است. هرچند این رابطه پیش‌بینی، اغلب لازم است تا تخمین اولیه‌ای از آبشستگی را مهیا کند. در این موارد لازم است تا پارامترهای محلی استفاده شوند [7].



شکل (۲-۲) عمیق شدن اضافه بستر در خم رودخانه [7]

۲-۳-۳- آبشستگی موضعی

این نوع آبشستگی، از اثر یک سازه بر الگوی جریان بطور موضعی تولید می‌شود و در پایین دست یا اطراف سازه مورد نظر و بطور کلی جایی که شدت جریان‌های متلاطم بطور موضعی افزایش یابد، رخ می‌دهد. این نوع آبشستگی ممکن است به تنهایی و یا همراه با آبشستگی‌های دیگر باشد. وقتی موانعی مثل اپی‌ها، سرریزها، آبشارها، شیب‌شکن‌ها و هر نوع سازه هیدرولیکی که در مقابل جریان قرار گیرد، به علت اختلاف فشار هیدرواستاتیکی در بالا و پایین دست سازه و همچنین برخورد جریان با این موانع و تغییر ناگهانی مسیر سرعت‌ها و تنش‌های محلی، یکسری جریان‌های گردابی^۱ بوجود می‌آید. این جریان‌های گردابی در پیرامون یا پایین دست سازه هیدرولیکی بوجود می‌آیند که عامل اصلی ایجاد آبشستگی در اطراف مانع مزبور می‌باشند. میزان عمق آبشستگی برای هر یک از سازه‌ها، بستگی به شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات رسوب و شرایط هندسی سازه دارد. با تخمین عمق آبشستگی از تخریب سازه جلوگیری می‌شود. فرمول خاصی برای تعیین عمق آبشستگی در حالات مختلف وجود ندارد.

1 - Eddy flow

روشی که معمولاً استفاده می‌شود، پیدایش رابطه‌ای در آزمایشگاه با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی می‌باشد. به علت دخیل بودن پارامترهای متعدد در میزان آبشستگی و عدم امکان بررسی و مطالعه تأثیر تغییر کلیه این پارامترها در آزمایشگاه، معمولاً آزمایش‌ها تحت شرایطی انجام می‌شود که تعدادی از پارامترها را ثابت نگه می‌دارند. از این رو معمولاً حتی برای یک سازه خاص، روابط متعددی در سالیان متمادی بوجود آمده است که متأسفانه نتایج آنها، ممکن است اختلافات زیادی نشان دهد [۴].

۲-۳-۴- انواع آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب

آبشستگی به لحاظ چگونگی حمل رسوب به دو حالت تقسیم می‌شود. تشخیص این دو حالت از آن جهت است که توسعه چاله آبشستگی با زمان و نیز ارتباط بین عمق آبشستگی و سرعت جریان، بستگی به حالت و نوع آبشستگی دارد [7].

۲-۳-۴-۱- آبشستگی در حالت آب زلال^۱

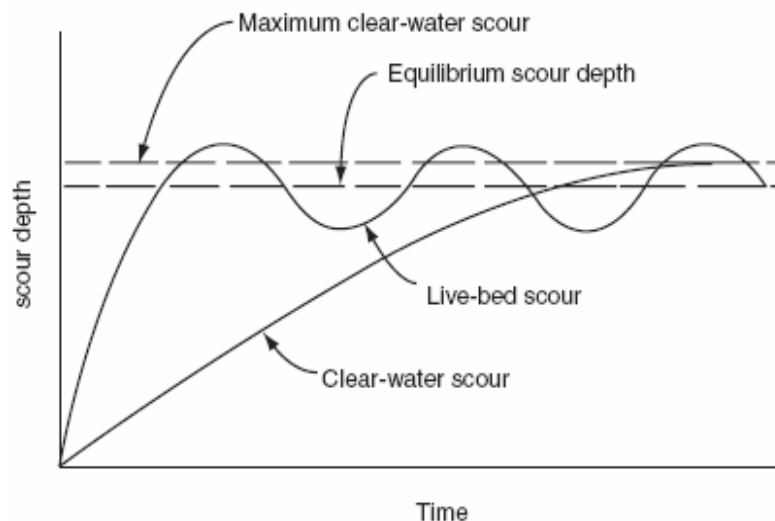
آبشستگی آب زلال، هنگامی رخ می‌دهد که هیچ رسوب بالادستی وجود نداشته باشد. در این صورت مواد بستر در جریان طبیعی، بالادست چاله آبشستگی در حال سکون می‌باشند یا هنگامی که بستر، بالادست چاله آبشستگی، ثابت باشد. اگر آبشستگی بوسیله جریانی ایجاد شود که انتقال رسوب (بار بستر و بار معلق) نداشته باشد، عمق آبشستگی به یک حد به طور مجانب نزدیک می‌شود. زمانی که سرعت تقارب^۲ بزرگتر از سرعت جریان متوسط بحرانی باشد، بستر بالادست معمولاً برای بازداشتن جریان نزدیک شونده از جابجایی ذرات، پوشیده می‌شود [7].

۲-۳-۴-۲- آبشستگی در حالت بستر فعال^۳

آبشستگی بستر فعال، نوعی آبشستگی با انتقال رسوب بر بستر توزیع نشده^۴ بالادست می‌باشد. ذرات رسوبی که دائماً بوسیله جریان منتقل می‌شوند، وارد چاله آبشستگی می‌شوند. در بعضی موارد عمق متعادل آبشستگی کوچکتر از عمق آبشستگی در شرایط آب زلال می‌باشد. به طور کلی در حالت بستر فعال، آبشستگی با زمان سریعاً افزایش پیدا می‌کند (شکل (۲-۳)) و سپس در محدوده عمقی متوسط، در

-
- 1 - Clear water scour
 - 2 - Approach velocity
 - 3 - Live bed scour
 - 4 - Undisturbed bed

پاسخ به مشخصات بستر که در حال عبور از آن است، نوسان می‌کند. بیشترین عمق آبشستگی، به تغییرات در عمق جریان، وابسته است [7].



شکل (۲-۳) عمق آبشستگی به عنوان تابعی از زمان [7]

۲-۳-۵- مراحل مختلف آبشستگی [7]

بر مبنای آزمایشات آبشستگی آب زلال که توسط بروسرز^۱، دیتز^۲ ۱۹۶۹ و زنک^۳ ۱۹۷۸ انجام شده است، بطور کلی پدیده آبشستگی دارای چهار مرحله قابل پیش‌بینی زیر می‌باشد:

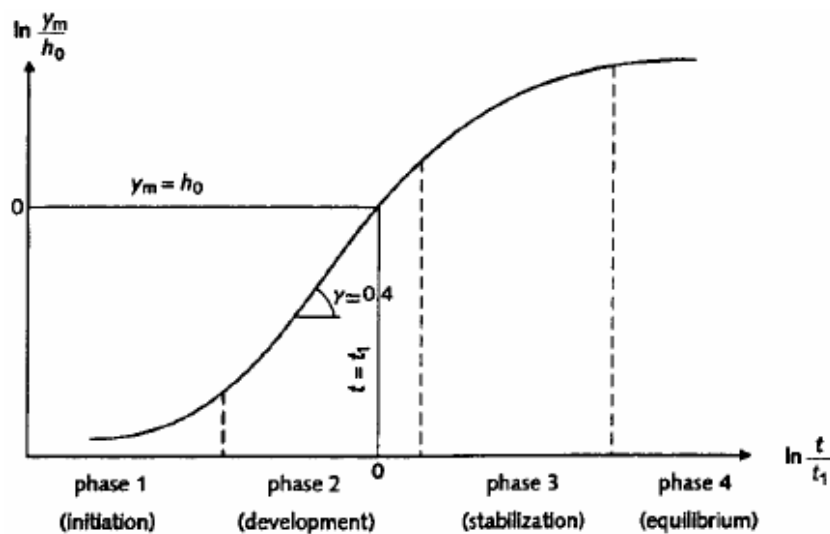
۱ - مرحله ابتدایی^۴

۲ - مرحله توسعه^۵

۳ - مرحله تثبیت^۶

۴ - مرحله تعادل^۷

- 1 - Breusers
- 2 - Dietz
- 3 - Zanke
- 4 - Initial phase
- 5 - Development phase
- 6 - Stabilization phase
- 7 - Equilibrium phase



شکل (۲-۴) توسعه فرآیند آبشستگی [7]

در مرحله ابتدایی، جریان در چاله آبشستگی، تقریباً در جهت طولی بطور یکنواخت برقرار است. در این مرحله از فرآیند آبشستگی، ظرفیت فرسایش بسیار شدید است. مشاهدات رسوبات ریز، نشان می‌دهد که در آغاز توسعه چاله آبشستگی، بعضی مواد بستر، نزدیک شیب آبشستگی^۱ بالادست، به حالت تعلیق در می‌آیند (Breusers, 1966 به نقل از مرجع ۷) بیشتر ذرات معلق، مسیرهای جابجایی^۲ را در جریان اصلی دنبال می‌کنند و به علت توازن داخلی بین شار پخشی^۳ صعودی و شار نزولی ناشی از ثقل، در حالت تعلیق باقی می‌مانند. بعضی از ذرات ته‌نشین می‌شوند و به سبب ترکیدهای^۴ بزرگ جریان آشفته نزدیک بستر، دوباره معلق می‌گردند، در صورتی که بعضی ذرات با ارتفاع پرش کوچکتر از حرکت جهشی^۵ تعریف شده یا ارتفاع مرجع، به عنوان بار بستر منتقل می‌شوند.

در مرحله توسعه، عمق چاله آبشستگی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند، اما شکل آن تغییر نمی‌کند. در این مرحله، نسبت بین عمق آبشستگی پیشینه و فاصله از انتهای حفاظت بستر، تا نقطه‌ای که چاله آبشستگی در بیشترین مقدارش می‌باشد، کم و بیش ثابت است. اندازه‌گیری‌های هافمن^۶ ۱۹۹۰، نشان می‌دهد که قسمت بالایی شیب چاله آبشستگی بالادست در حال تعادل است، در حالی که قسمت پایینی هنوز در حال پیشرفت می‌باشد. بار معلق نزدیک به بستر، به طور قابل توجهی در مقایسه

- 1 - Scour slope
- 2 - Convectonal paths
- 3 - Diffusive flux
- 4 - Bursts
- 5 - Saltation
- 6 - Haffmans

با شرایط مرحله ابتدایی، کاهش پیدا می‌کند. این موضوع به کاهش سرعت جریان نزدیک بستر، با وجود افزایش انرژی اغتشاش، مربوط می‌شود. اگر چه ذرات بستر توسط جریان برداشته و حمل می‌شوند، زمان متوسط انتقال رسوب در قسمت فوقانی شیب چاله آبشستگی بالادست، اندک است، زیرا سهم انتقال رسوب ناشی از سرعت‌های لحظه‌ای در جهت پایین دست تقریباً مساوی انتقال حاصل از سرعت‌های لحظه‌ای در جهت بالادست است.

در مرحله تثبیت، آهنگ پیشرفت عمق آبشستگی بیشینه، کاهش می‌یابد. ظرفیت فرسایش در عمیق‌ترین بخش چاله آبشستگی، در مقایسه با ظرفیت فرسایش پایین دست نقطه اتصال مجدد^۱، خیلی کم است، به گونه‌ای که ابعاد چاله آبشستگی در جهت طولی، نسبت به جهت عمودی، بیشتر افزایش می‌یابد. فرآیند آبشستگی ادامه پیدا می‌کند، سرعت‌های جریان، بالای قسمت پایینی شیب چاله آبشستگی بالادست، کاهش پیدا می‌کند. در مرحله تثبیت، حالت تعادل برای شیب آبشستگی بالادست و عمق آبشستگی بیشینه، تقریباً بدست می‌آید.

مرحله تعادل، به عنوان مرحله‌ای تعریف می‌شود که ابعاد چاله آبشستگی به طور قابل ملاحظه‌ای، تغییر نکند.

۲-۴- نتیجه‌گیری

در این فصل، کلیاتی درباره فرآیندهای فرسایش و آستانه حرکت ذرات بیان شد. سه روش مهم و عمده برای بدست آوردن روابط هیدرولیکی در زمان شروع حرکت ذره عبارتند از روش تنش بحرانی، روش سرعت بحرانی و تئوری رژیم. در این فصل با تعریف پدیده آبشستگی و مفاهیم اولیه آن آشنا شدیم. آبشستگی که ممکن است در یک سازه اتفاق بیافتد، به آبشستگی عمومی و آبشستگی موضعی تقسیم می‌شود. در حالت آبشستگی عمومی، کلیاتی درباره کاهش تراز کلی، آبشستگی تنگ‌شدگی و آبشستگی در خم‌ها بیان شد. آبشستگی به لحاظ چگونگی حمل رسوب، به دو حالت آبشستگی در حالت آب زلال و آبشستگی در حالت بستر فعال تقسیم می‌شود. مراحل مختلف آبشستگی شامل مرحله ابتدایی، مرحله توسعه، مرحله تثبیت و مرحله تعادل می‌شود.

فصل سوم

آبشستگی پایین دست سازه‌های

کنترل شیب

۳-۱- مقدمه

سازه‌های کنترل شیب از کاهش تراز اضافی بستر در کانال‌های آبرفتی جلوگیری می‌کنند. اما عمل فرسایشی جریان آب، باعث آبشستگی موضعی جدی پایین دست می‌شود که ممکن است آنها را از زیر خراب کند. بنابر این ملاحظات طراحی ساختمانی، شامل تدابیر حفاظتی کافی در مقابل آبشستگی موضعی پایین دست سازه‌های کنترل شیب می‌شود. در همین راستا، تدابیر حفاظتی مناسب می‌تواند فقط با درک کامل مکانیسم، موقعیت و وسعت آبشستگی پایین دست، صورت پذیرد.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی زیادی در خصوص عمق آبشستگی در شرایط گوناگون جریان و شکل‌های مختلف سازه انجام شده است. هدف از این فصل مروری بر تحقیقات تجربی در خصوص آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب و روابط پیشنهاد شده توسط محققان مختلف می‌باشد. از آنجا که دو تحقیق صورت گرفته در سال ۱۹۹۱ توسط بورمن^۱ و ژولین^۲ و سال ۲۰۰۴ توسط دی‌آگوستینو^۳ و فرو^۴، جزو تحقیقات برجسته این موضوع می‌باشند، این دو تحقیق با جزئیات بیشتری بررسی می‌شوند.

۳-۲- طرح مسأله

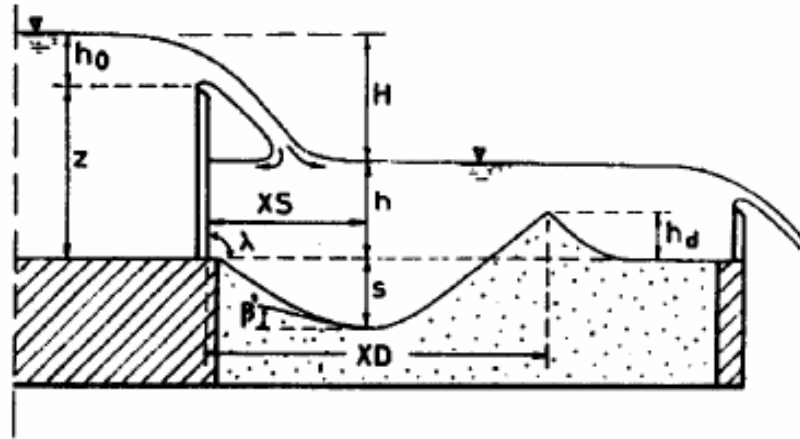
آبشستگی موضعی پایین دست سازه کنترل شیب به عرض سرریزی b و ارتفاع ریزش z (شکل (۳-۱)) در بستر آبرفتی، پدیده‌ای است که برحسب تخمین عمق فرسایش بیشینه بالقوه، پیچیده می‌باشد. در طی مرحله شکل‌گیری پروفیل آبشستگی، انتقال رسوب موضعی تا حدی فعال است، تا زمانی که با نزدیک شدن به شرط تعادل، پدیده به سمت مکانیزمی کاملاً هیدرولیکی متمایل می‌شود، بطوریکه پروفیل چاله، نتیجه توازن جرمی بین ذرات برداشته شده و ذرات ته‌نشین شده درون چاله آبشستگی می‌باشد [8].

1 - Noel E. Bormann

2 - Pierre Y. Julien

3 - Vincenzo D'Agostino

4 - Vito Ferro



شکل (۱-۳) طرح آبستگي در بستر آبرفتي پايين دست سازه کنترل شيب [8]

دودياه و همكاران (Doddiah et al., 1953 به نقل از مرجع ۸) و راوس (Rouse, 1940) به نقل از مرجع ۸) نشان دادند كه عمق آبستگي s با ميانگين هندسي زمان T طبق رابطه زير افزايش مي يابد:

$$\frac{s}{h} = k_1 + k_2 \log\left(\frac{QT}{bz^2}\right) \quad (1-3)$$

k_1 و k_2 ضرايب ثابت هستند، h عمق پاياب نسبت به تراز بستر شسته نشده و Q دبي جريان مي باشد. مرور جامع نوشته ها و تجزيه و تحليل اطلاعات توسط ميسون^۱ و آروماگم^۲، ثابت مي كند كه مفهوم عمق آبستگي نهايي، براي همه اهداف عملي معتبر است. اين نتيجه گيري، انتخاب دودياه و همكاران را در ناپايده گرفتن اثرات ناپايدار، تصديق مي كند و مقدار QT/bz^2 را براي ساده تر كردن کاربرد رابطه وابستگي زماني توسعه يافته (معادله ۱-۳))، برابر 3×10^5 تنظيم مي كند [9].

فاصله XD بين وجه پايين دست سازه کنترل شيب و تاج تلماسه^۳، توسط دي آگوستينو، با صرف نظر از تأثير دانه بندي بستر، تخمين زده شده است. براي بستر افقي پايين دست سرريز و ريزش عمودي آزاد، دي آگوستينو رابطه زير را براي تخمين XD پيشنهاد مي كند [8]:

$$\frac{XD}{z} = 3.55 \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} + 0.34 \quad (2-3)$$

در رابطه فوق $q = Q/b$ دبي در واحد عرض سرريز مي باشد.

- 1 - Mason
- 2 - Arumugam
- 3 - Dune

میسون و آروماگم، برخی فرمول‌های آبشستگی تحت جت‌های ریزشی آزاد را با استفاده از اطلاعات مدل و نمونه اصلی، آزمایش کردند. نتیجه بررسی و آزمایش فرمول‌های مختلف، معادله زیر می‌باشد که برای پیش‌بینی عمق آبشستگی s به کار می‌رود [9]:

$$\frac{s}{\left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}} = (6.42 - 3.10H^{0.1})g^{-H/600} \left(\frac{gH^3}{q^2}\right)^{20+H/600} \left(\frac{H}{d_s}\right)^{1/10} \left(\frac{h}{H}\right)^{3/20} \quad (3-3)$$

h عمق پایاب (m)، H اختلاف ارتفاع بین تراز آب در بالادست و پایاب (m)، g شتاب ثقل m/s^2 و d_s معرف اندازه ذرات بستر (m) می‌باشند.

میسون و آروماگم توصیه می‌کنند که d_s برابر d_m یعنی مقدار متوسط اندازه دانه‌ها انتخاب شود [9].

۳-۳- بررسی رابطه ارائه شده توسط بورمن و ژولین

بورمن و ژولین در سال ۱۹۹۱، رابطه‌ای را برای محاسبه عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب ارائه کردند. این رابطه بر اساس یکسری آزمایش‌های بزرگ مقیاس می‌باشد که بمنظور کالیبره کردن معادله نیمه تئوری عمق آبشستگی، پیشنهاد شده است. اهدافی که آنها در تحقیق‌شان دنبال کردند، به دو بخش تقسیم می‌شود:

۱- استنتاج معادله آبشستگی تعادلی، مبتنی بر مفهوم پخشیدگی^۱ جت و پایداری ذره در چاله آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب.

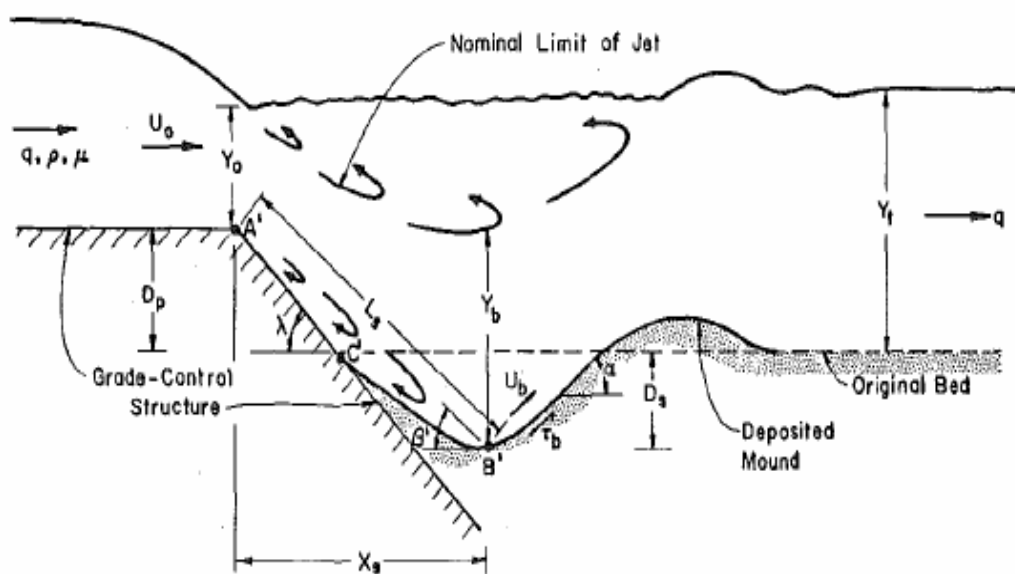
۲- ارزیابی معادله ارائه شده به کمک آزمایش‌های بزرگ مقیاس با اندازه‌های عمق آبشستگی موضعی تا ۱/۴ متر.

۳-۳-۱- خصوصیات جریان پایین دست سازه‌های کنترل شیب [10]

شکل (۳-۲)، یک سازه کنترل شیب را نشان می‌دهد. هنگامی که جریان پایین دست نقطه A' وارد پایاب Y_t می‌شود، جت شناوری با سرعت میانگین U_0 و ضخامت Y_0 که بین نقاط A' و B' پخش می‌شود، به طور خنثی بوسیله جریان تشکیل می‌شود. جریان در نقطه A' از سازه جدا می‌شود و گردابه‌ای^۲ در منطقه جدایی تشکیل می‌دهد. با کاهش فشار بین نقاط A' و C' ، جت به سمت مرز، با

1 - Diffusion
2 - Vortex

زاویه β' ، به علت اثر کواندا^۱ اگرایش سیال برای چسبیدن به سطح جامد، منحرف می‌شود. سرعت جریان پخش شده U_b در مجاورت B' ، تنش برشی بر ذرات رسوبی بستر اعمال می‌کند. هنگامی که تنش برشی اعمال شده از تنش برشی بحرانی بیشتر شود، رسوبات از ناحیه برخورد کنده می‌شوند و آبشستگی پیشرفت می‌کند. لازم به ذکر است که آبشستگی بستر فعال، زمانی رخ می‌دهد که نرخ جدا شدن ذرات از نرخ انتقال ذرات به چاله آبشستگی فراتر رود.



شکل (۲-۳) طرح آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب (بورمن و ژولین (۱۹۹۱)) [10]

حالت تعادل زمانی فرا می‌رسد که نرخ آبشستگی به صفر نزدیک شود. برای آبشستگی آب زلال، تا زمانی که آبشستگی پیشرفت می‌کند و نیروی هیدرودینامیکی خارج از چاله آبشستگی بر ذراتی که جابجایی اضافی ندارند اعمال می‌شود، طول پخشیدگی L_s زیاد و سرعت پخش U_b کم می‌شود. بیشترین عمق آبشستگی D_s ، از طول پخشیدگی L_s ، زاویه جت β' بین A' و B' و ارتفاع شیب‌شکن D_p سازه کنترل شیب، تعیین می‌شود:

$$D_s = L_s \sin \beta' - D_p \quad (۴-۳)$$

میدان‌های جریان، در هر دو نمونه اصلی^۱ و آزمایشگاهی به علت اثرات جدار^۲، دقیقاً دو بعدی نیستند. اما مشخصه سه بعدی جریان به هر حال در مقایسه با میدان جریان دو بعدی حاکم تولید شده از سازه‌های کنترل شیب مستطیلی عریض، ناچیز شمرده می‌شود. آبشستگی موضعی حاصل از شکل‌های گوناگون جت‌های دو بعدی به موارد زیر وابسته است:

۱ - مسیر جت

۲ - پخشیدگی جت در پایاب

۳ - پایداری ذرات در چاله آبشستگی

۳-۳-۲- مسیر حرکت جت [10]

اثرات دو نوع جت مستغرق و آزاد، باید بطور جداگانه مطالعه شوند. مطابق شکل (۳-۲) در شرایط استغراق جزئی جریان، جت در اثر گرانش و اثر کواندا منحرف می‌شود. تحلیل ابعادی زاویه انحراف جت β' برای جت‌های مستغرق، پارامترهای بی بعد زیر را تولید می‌کند:

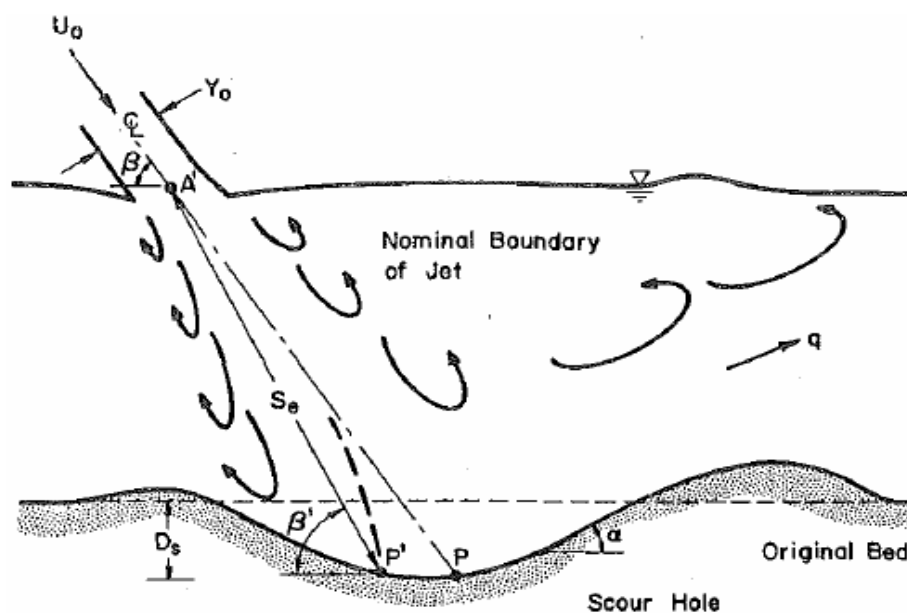
$$\beta' = f\left(\frac{D_p + Y_0}{Y_0}, \frac{U_0^2}{gY_0}, \frac{Y_0}{Y_t}, \sin \lambda\right) \quad (5-3)$$

g شتاب ثقل و λ زاویه وجه سازه کنترل شیب می‌باشد.

رابطه خاص متغیرهای معادله (۵-۳) به طور تجربی، از داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید، زیرا افت‌های انرژی و توزیع‌های فشار اطراف جت، نمی‌توانند به طور مستقیم محاسبه شوند.

جت آزاد (شکل (۳-۳))، زمانی اتفاق می‌افتد که جتی از آب در حالی که بوسیله فشار اتمسفریک احاطه شده است، وارد پایاب شود. تحلیل اطلاعات جت آزاد یوئن (Yuen, 1984) به نقل از مرجع (۱۰)، نشان می‌دهد که زاویه β' می‌تواند توسط زاویه تماسی β تقریب زده شود. تحلیلی از هندسه چاله آبشستگی، نشان می‌دهد که زاویه شیب وجه پایین دست α تقریباً برابر زاویه جت β' است، و بنابر این $\alpha \approx \beta'$ ، بعنوان اولین تقریب برای شیب وجه پایین دست چاله آبشستگی، بکار می‌رود.

1 - Prototype
2 - Sidewall



شكل (۳-۳) مسير جت آزاد [10]

۳-۳-۳- پخشیدگی جت [10]

خصوصیات جت‌های دو بعدی گذرنده از پایاب و تماسی روی مرز صلب صاف، توسط بلتاوس و راجاراتنام (*Beltaos & Rajaratnam, 1973* به نقل از مرجع ۱۰)، تحقیق شده‌اند. این نتایج کاملاً مشابه با نتایج آلبرتسون و همکاران (*Albertson et al., 1950* به نقل از مرجع ۱۰) می‌باشد. ناحیه جریان برقرار شده جت، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_s \geq C_d^2 Y_0 \quad (۶-۳)$$

ضریب پخشیدگی جت C_d ، به شرایط ورودی بستگی دارد و تقریباً مستقل از جهت جت باقی می‌ماند. مقادیر پیشنهادی C_d ، توسط آلبرتسون و همکاران، بلتاوس و راجاراتنام و یوئن، از ۲ تا ۲/۴ برای جت‌های خوب تشکیل شده تغییر می‌کند و به شرایط ورودی وابسته می‌باشد. سرعت جت پخش شده در چاله آبستگی U_b و ضخامت جت پخش شده Y_b بعد از برخورد جت روی مرز، بوسیله معادلات زیر تقریب زده می‌شوند:

$$U_b = C_d U_0 \left(\frac{Y_0}{L_s} \right)^{0.5} \quad (۷-۳)$$

$$Y_b = \frac{U_0}{U_b} Y_0 \quad (۸-۳)$$

موقعیت سرعت U_b ، به زبری مرزی تعریف شده بوسیله اندازه ذرات، که همچنین برای تأثیر شکل چاله آبستگی ظاهر می‌شود، بستگی دارد (*Kobus et al., 1979* به نقل از مرجع ۱۰). بیشترین زاویه

شيب وجه پايين دست چاله آبستگي α ، نزديک نقطه بيشترين تنش برشي رخ مي‌دهد که توسط بلتاوس و راجاراتنام پيش‌بيني شده است.

۳-۳-۴- پاييداري ذره [10]

تحليل پاييداري ذره غيرچسبنده در چاله آبستگي، شرايط تعادل بين وزن ذره و نيروي هيدروديناميكي توليد شده بوسيله سرعت جت پخش شده را تعيين مي‌کند. تنش برشي بستر τ_b به عنوان تابعي از سرعت جت پخش شده U_b ، نوشته مي‌شود:

$$\tau_b = C_f \rho U_b^2 \quad (۹-۳)$$

C_f ضريب اصطکاک موضعي و ρ جرم مخصوص آب مي‌باشند.

چندين تحقيق گزارش شده توسط بوگاردی (*Bogardi, 1974*) به نقل از مرجع (۱۰)، نشان مي‌دهند که C_f مي‌تواند به عنوان تابعي ساده از زبري نسبي بيان شود:

$$C_f = \frac{\theta_{cr}}{B} \left(\frac{d_s}{Y_b} \right)^x \quad (۱۰-۳)$$

d_s اندازه رسوب و مقادير B و x در جدول (۱-۳) داده شده‌اند. مقدار بحراني عدد شيلدز θ_{cr} براي ذرات غيرچسبنده از دياگرام شيلدز براي شرايط صاف و زبر هيدروليكي جريان، بدست مي‌آيد. براي جريان‌هاي كاملاً مغشوش توسعه یافته روی مرز زبر، θ_{cr} تقريباً در عدد ۰/۰۴۷ ثابت است. در لايه مرزي توسعه یافته، مقدار θ_{cr} ، ۰/۱۱ گزارش شده است. مقدار θ_{cr} ، به تنش برشي بحراني τ_{cr} متناظر با شروع حرکت ذره در بستري افقي، بوسيله معادله زير مربوط مي‌شود:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} (\gamma_s - \gamma) d_s \quad (۱۱-۳)$$

γ_s وزن مخصوص رسوبات و γ وزن مخصوص آب مي‌باشد.

جدول (۳-۱) پارامترهای ضریب اصطکاک موضعی [10]

Source (1)	Coefficient B (2)	Exponent x (3)
Straub (1953)	2.2	0.33
Bogardi (1974a)	0.001 ^a	1.20
Bogardi (1974b)	2.9	0.19
Neill (1968)	2.0	0.33

^aIn the original equation, an additional term also influences B .

تحلیل سه بعدی کاملی از نیروها و گشتاورها در ذره‌ای تنها که توسط استیونس و سیمونز (Stevens & Simons, 1971) به نقل از مرجع (۱۰) معرفی شده است، انجام شد. تنش برشی بحرانی τ_b لازم برای حرکت ذرات رسوبی در شیب بالا با زاویه α در امتداد پایین دست، هنگامی بدست می‌آید که ضریب پایداری برای زاویه خاکریز α ، واحد و زاویه جریان 90° باشد. نسبت متناظر تنش‌های برشی، برای بستر شیبدار τ_b در مقابل بستر تخت τ_{cr} ، به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} = \frac{\sin(\phi + \alpha)}{\sin \phi} \quad (12-3)$$

ϕ زاویه ایستایی مستغرق مواد دانه‌ای می‌باشد.

در شرایط تعادل آبهستگی، فاصله پخشیدگی، تا بیشترین عمق آبهستگی L_s بعد از ترکیب معادلات (۷-۳) و (۸-۳) و (۹-۳) و (۱۰-۳) و (۱۱-۳) و (۱۲-۳) و حل برای L_s ، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L_s = \left[\frac{\rho \sin \phi}{B(\gamma_s - \gamma) \sin(\phi + \alpha)} \right]^{2/(2+x)} C_d^2 \frac{Y_0^{(2-x)/(2+x)} U_0^{4/(2+x)}}{d_s^{(2-2x)/(2+x)}} \quad (13-3)$$

ارزش عددی هر توان در معادله (۱۳-۳)، فقط به x بستگی دارد. کار تجربی کوباس و همکاران (Kobus et al, 1979) به نقل از مرجع (۱۰)، نشان می‌دهد که تنش برشی در مرز زبر، به زبری نسبی جت برخورد، بزرگ شده تا توان ۰/۴۱ بستگی دارد. ظاهراً x به هندسه جریان و تخلخل بستر نیز بستگی دارد. برای حالت مورد بحث اینجا، نتایج پیش‌گویانه، زمانی که $x = 0.5$ بهتر می‌شود. این مقدار، به محدوده مقادیر x مندرج در جدول (۱-۳)، تعلق دارد.

عمق آبهستگی متعادل متناظر D_s ، مستقیماً از معادلات (۴-۳) و (۱۳-۳) محاسبه می‌شود:

$$D_s = \left\{ \left[\frac{\gamma \sin \phi}{\sin(\phi + \alpha) B(\gamma_s - \gamma) g} \right]^{0.8} \frac{C_d^2 Y_0^{0.6} U_0^{1.6}}{d_s^{0.4}} \sin \beta' \right\} - D_p \quad (14-3)$$

معادله (۱۴-۳) به صورت زیر نیز نوشته می‌شود:

$$D_s + D_p = Kq^{0.6} \frac{U_0}{g^{0.8} d_s^{0.4}} \sin \beta' \quad (15-3)$$

در معادله بالا، $q = U_0 Y_0$ و $K = C_d^2 [\gamma \sin \phi / \sin(\phi + \alpha) B(\gamma_s - \gamma)]^{0.8}$ می‌باشد.

میسون و آروماگم عمق آبستگي متعادل مشابه فرمول فوق را از معادلات آبستگي موضعي تجربي پيشنهاده شده توسط ساير محققين در جدول (۲-۳) خلاصه کرده‌اند. فرمول كلي مورد استفاده آنها به شرح زير است:

$$D_s + D_p = K \frac{q^a U_0^b \Delta H^c Y_t^d \beta'^e}{g^f d_s^i} \quad (16-3)$$

a, b, c, d, e, f, i توان‌هاي معادله آبستگي هستند و ΔH هد شيبشكن سرتاسر سازه می‌باشد (m) و g شتاب گرانش (m/s^2) و d_s اندازه مؤثر رسوبات (m) می‌باشد. متغيرهاي ديگر قبلاً تعريف شده‌اند و در سيستم متریک می‌باشند.

بيشترين مطالعات عمق آبستگي تجربي مندرج در جدول (۲-۳)، مربوط به جت‌هاي تماسي عمودي می‌شود، و فقط سه مطالعه (*Chee and Kung 1971; Chee et al. 1972; Yuen 1984*) مربوط به حالت جت آزاد غيرعمودي می‌شود.

معادله (۱۵-۳) پيشنهاده‌ي، پخشيدگي جت و پايداري ذرات رسوبي را در چاله آبستگي، نشان می‌دهد. از بررسي جدول (۲-۳) نتايج زير حاصل می‌شود.

۱ - تأثيرات q با توجه به بزرگ بودن توان a ، قابل توجه است.

۲ - مقدار توان i نيمي از معادلات نيز مشابه معادله (۱۵-۳) و حدوداً برابر $i = 0.4$ است. در بقيه موارد $i = 0.1$ می‌باشد.

۳ - معادله پيشنهاده شده (۱۵-۳)، مشابه ساير معادلات جدول (۲-۳) است.

جدول (۲-۳) خلاصه معادلات آبستگي موضعي $D_s + D_p = Kq^a U_0^b \Delta H^c Y_t^d \beta^{e'} / g^f d_s^i$ [10]

Investigator (1)	K (2)	a (3)	b (4)	c (5)	d (6)	e (7)	f (8)	i (9)
Schoklitsch (1932)	0.5	0.57	0	0.2	NA	NA	NA	0.32
Veronese (1937a)	0.2	0.54	0	0.225	NA	NA	NA	0.42
Veronese (1937b)	1.9	0.54	0	0.225	NA	NA	NA	NA
Jaeger (1939)	0.6	0.50	0	0.25	0.33	NA	NA	0.33
Eggenberger (1943)	1.4	0.60	0	0.50	NA	NA	NA	0.40
Mueller and Eggenberger (1944)	— ^a	0.60	0	0.50	NA	NA	0.8	0.40
Hartung (1959)	1.4	0.64	0	0.36	NA	NA	NA	0.32
Damle et al. (1966)	0.6	0.50	0	0.50	NA	NA	NA	NA
Chee and Padiyar (1969)	2.1	0.67	0	0.18	NA	NA	NA	0.06
Chee and Kung (1971)	1.7	0.60	0	0.20	NA	NA	NA	0.10
Chee et al. (1972)	1.9	0.60	0	0.20	NA	-0.4	NA	0.10
Martins (1975)	1.5	0.60	0	0.10	NA	NA	NA	NA
Chee and Yuen (1985)	0.6	0.45	0.55	NA	NA	1.0 ^b	NA	0.10
Mason and Arumugam (1985) ^c	3.27	0.60	0	0.05	0.15	NA	0.30	0.10
Bormann (1988a)	0.7	0.45	1.0	NA	0.12	0.66 ^b	0.73	0.30
Eq. (15 - 3)	— ^d	0.60	1.0	NA	NA	1.0 ^b	0.8	0.4

^aK depends on jet configuration.

^bUses $\sin \beta'$.

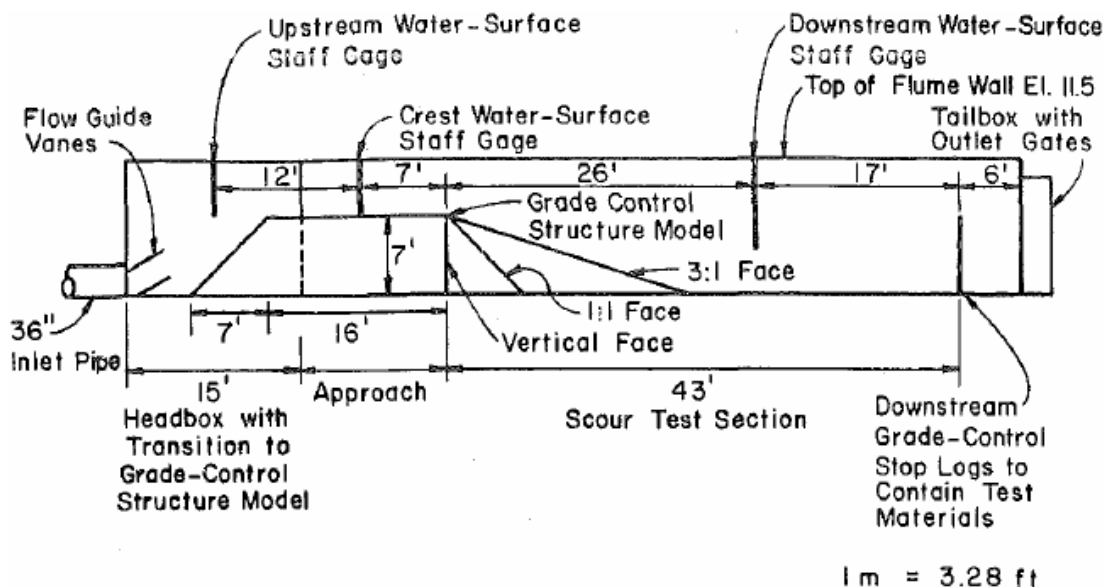
^cSummary of many previous equations, values of exponent vary with H .

^dConstant depends on inlet geometry and sediment properties.

Note: NA = not applicable.

۳-۳-۵- آزمایش‌های بزرگ مقیاس [10]

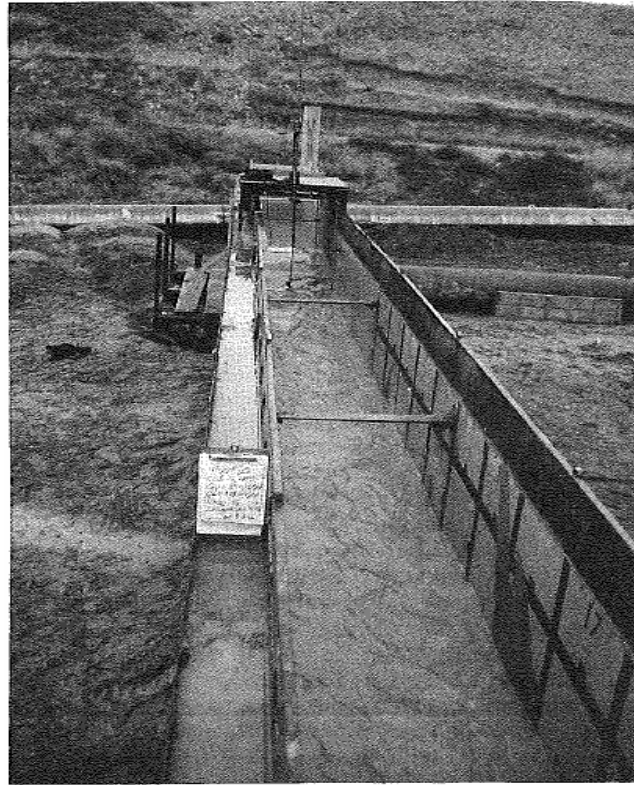
تحقیق آزمایشگاهی بزرگ مقیاسی با دبی‌های در واحد عرض در محدوده ۰/۳ تا ۲/۵ متر مربع بر ثانیه و بیشترین اعماق آبستگي تا ۱/۴ متر، با استفاده از یک کانال پایه‌دار صحرایی در مرکز تحقیقات مهندسی دانشگاه ایالتی کلرادو^۱ انجام شد. تأسیسات، شامل جعبه هد ورودی، مقطع تقارب، مقطع تست آبستگي و جعبه انتهایی خروجی بود (شکل (۳-۴)). پمپی با جریان درهم، به قطر ۰/۹۱ متر برای ایجاد جریانی تا ۲/۷ متر مکعب بر ثانیه، در مقطع آزمایش کانال پایه‌دار آماده شد. کانال پایه‌دار، دارای عمق کلی ۳/۵ متر، طول کلی ۲۷/۴ متر و عرض ۰/۹۱ متر بود. تراز تاج مدل سازه کنترل شیب، ۲/۱۳ متر بالای کف کانال پایه‌دار تنظیم شد. هنگامی که مدل بر طبق معیار تشابه فرود، مقیاس‌بندی شد، مقیاس مدل خیلی بزرگتر از مقیاس آزمایش‌های گزارش شده قبلی بود. در حقیقت در این مقیاس، آزمایش‌های مدلی با بعضی مقادیر آبستگي نمونه اصلی که توسط بورمن (۱۹۸۸) بحث شده بود، مطابقت می‌کرد.



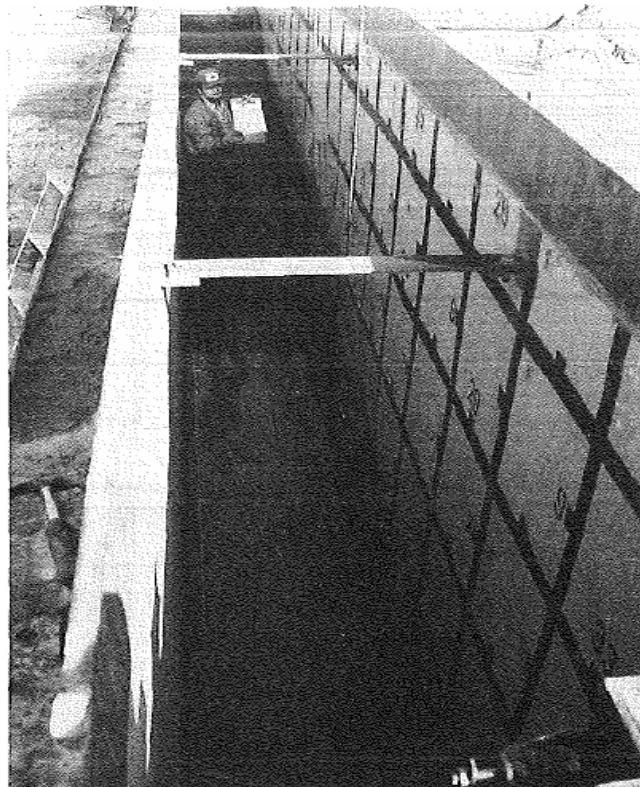
شکل (۳-۴) طرح کانال پایه‌دار آزمایشی بزرگ مقیاس [10]

مقطع آزمایش آبشستگی، از تاج مدل سازه کنترل شیب، تعریف می‌شود. صفحه‌های فولادی به دیوارهای کانال پایه‌دار جوش داده شد، تا شیب وجه‌های مختلف سازه آزمایش شده را ایجاد کند. مقطع آزمایش آبشستگی، ۱۳ متر (۴۳ فوت) از تاج به سمت پایین دست مدل کنترل شیب، فراتر رفت. تیرک‌های سدکننده^۱ پایین دست، ارتفاع شیب‌شکن را از تاج تا تراز کف رسوبات کنترل می‌کردند. آب در کانال پایه‌دار، بر روی تیرک‌های سدکننده، به سوی جعبه انتهایی که عمق پایاب را در مقطع آزمایش، کنترل می‌کرد، جاری بود. ترازسنج نقطه‌ای، در یک واگن^۲ مکانیکی برای اندازه‌گیری ارتفاع‌های بستر شسته شده در مرکز کانال پایه‌دار، نصب شد. ارتفاع‌های سطح آب با استفاده از سه خط‌کش مدرج اندازه‌گیری شدند. شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶)، دو عکس از کانال پایه‌دار آزمایشی را نشان می‌دهد. شکل (۳-۵)، آزمایشی کوچک در دبی $0.128 \text{ (m}^2/\text{s)}$ را نشان می‌دهد. شکل (۳-۶)، کانال پایه‌داری را بعد از آزمایش در دبی $2.32 \text{ (m}^2/\text{s)}$ ، نشان می‌دهد. شیب سازه، در $3H:1V$ تنظیم شد و عمق آبشستگی در این اجرای خاص، از $1/98$ متر فراتر رفت و به صفحه کف کانال پایه‌دار رسید.

- 1 - Stop logs
- 2 - Carriage



شکل (۳-۵) کانال پايه دار در جريان کم [10]



شکل (۳-۶) کانال پايه دار آزمايشي با عمق آبستگي تقريباً ۲ متر [10]

مجموعه داده‌ها، شامل نود و نه آزمايش بود که يازده تاي آنها به علت ظاهر شدن آبستگي زير کانال پايه‌دار، حذف شد. باقي هشتاد و هشت اندازه‌گيري اعماق آبستگي، در جدول (۳-۳) خلاصه شده‌اند. پارامترهاي درج شده در جدول (۳-۳)، در شکل (۲-۳) نمايش داده شده‌اند، بطوریکه d_{90} و d_{50} ، قطر الک استاندارد، براي ۵۰٪ و ۹۰٪ ذرات ريزتر، را مشخص مي‌کنند. استغراق جريان، از تقسيم عمق پاياب بالاي تاج سازه بر عمق جريان روی سازه، محاسبه مي‌شود. لازم به ذکر است به علت عدم توزيع فشار هيدرواستاتيک، عمق جريان در محل شيب‌شکن متفاوت از ضخامت جت ورودی به پاياب است.

جدول (۳-۳) خلاصه داده‌هاي آزمايشي [10]

Test number (1)	Y_o (m) (2)	U_o (m/s) (3)	D_p (m) (4)	Y_f (m) (5)	D_s (m) (6)	X_s (m) (7)	d_{90} (mm) (8)	d_{50} (mm) (9)	λ radian (10)	Relative submergence (%) (11)	q (m^2/s) (12)	β' radian (13)	L_s (m) (14)
1	0.94	2.38	0.15	1.25	1.12	6.10	1.58	0.30	0.79	90	2.25	0.21	6.23
2	0.94	2.38	0.15	1.25	1.02	6.10	1.58	0.30	0.79	90	2.25	0.19	6.21
3	0.94	2.38	0.15	0.25	1.02	6.10	1.58	0.30	0.79	90	2.25	0.19	6.21
4	0.57	3.92	0.15	0.98	1.46	6.10	1.58	0.30	0.79	71	2.22	0.26	6.31
5	0.57	3.92	0.15	0.88	1.40	7.93	1.58	0.30	0.79	63	2.22	0.19	8.08
6	0.88	1.95	0.15	1.07	1.01	6.71	1.58	0.30	0.79	86	1.72	0.17	6.81
7	0.88	1.95	0.15	1.07	1.10	4.88	1.58	0.30	0.79	86	1.72	0.25	5.04
8	0.88	1.95	0.15	1.07	1.08	5.49	1.58	0.30	0.79	86	1.72	0.22	5.62
9	0.48	3.58	0.15	0.82	1.16	5.49	1.58	0.30	0.79	67	1.71	0.23	5.64
10	0.48	3.58	0.15	0.82	1.07	5.49	1.58	0.30	0.79	66	1.71	0.22	5.62
11	0.48	3.58	0.15	0.82	1.14	6.10	1.58	0.30	0.79	66	1.71	0.21	6.23
12	0.48	3.58	0.15	0.82	1.28	6.10	1.58	0.30	0.79	66	1.71	0.23	6.26
13	1.19	1.52	0.25	1.50	0.72	4.27	1.58	0.30	0.79	93	1.81	0.22	4.38
14	0.75	2.38	0.25	1.09	0.98	7.32	1.58	0.30	0.79	70	1.78	0.17	7.42
15	0.46	3.84	0.25	0.92	1.30	6.10	1.58	0.30	0.79	56	1.78	0.25	6.29
16	1.16	2.07	0.25	1.44	0.55	6.10	1.58	0.30	0.79	91	2.40	0.13	6.15
17	0.55	4.23	0.25	0.91	1.32	6.71	1.58	0.30	0.79	52	2.32	0.23	6.89
18	1.17	1.65	0.05	1.28	0.66	4.27	1.58	0.30	0.79	93	1.93	0.17	4.33
19	0.79	2.87	0.05	0.94	1.08	6.71	1.58	0.30	0.79	70	2.27	0.17	6.80
20	0.54	4.27	0.05	0.71	1.21	6.71	1.58	0.30	0.79	51	2.32	0.19	6.82
21	0.52	3.73	0.05	0.86	0.97	4.88	1.58	0.30	0.79	71	1.94	0.21	4.98
22	0.53	3.76	0.05	0.74	1.26	7.93	1.58	0.30	0.79	62	1.99	0.16	8.03
23	1.13	2.19	0.23	1.46	0.96	4.27	1.71	0.45	0.79	92	2.47	0.27	4.43
24	0.58	3.97	0.23	1.08	1.06	6.71	1.71	0.45	0.79	70	2.32	0.19	6.83
25	0.55	4.23	0.23	0.88	1.39	7.93	1.71	0.45	0.79	53	2.32	0.20	8.09
26	1.04	1.37	0.23	1.26	0.70	3.66	1.71	0.45	0.79	92	1.42	0.25	3.77
27	0.43	3.40	0.23	0.87	0.89	4.88	1.71	0.45	0.79	70	1.46	0.22	5.00
28	0.40	3.70	0.23	0.66	1.10	4.88	1.71	0.45	0.79	47	1.46	0.27	5.06
29	0.69	0.88	0.23	0.93	0.27	2.44	1.71	0.45	0.79	96	0.61	0.20	2.49
30	0.34	1.71	0.23	0.59	0.29	3.05	1.71	0.45	0.79	72	0.58	0.17	3.09
31	0.20	3.00	0.23	0.45	0.56	3.66	1.71	0.45	0.79	46	0.60	0.21	3.74
32	0.19	3.11	0.23	0.39	0.62	3.05	1.71	0.45	0.79	33	0.59	0.27	3.17
33	0.25	1.36	0.23	0.48	0.10	1.83	1.71	0.45	0.79	72	0.34	0.18	1.86
34	0.14	2.47	0.23	0.39	0.15	1.83	1.71	0.45	0.79	48	0.34	0.20	1.87
35	0.12	2.80	0.23	0.30	0.39	2.44	1.71	0.45	0.79	20	0.33	0.25	2.52

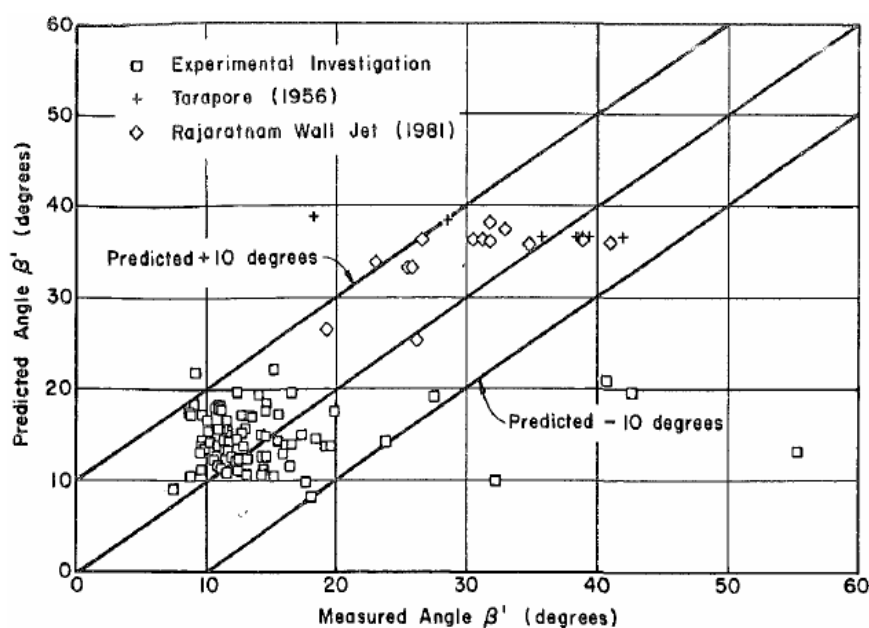
ادامه جدول (۳-۳)

36	0.12	2.87	0.23	0.28	0.93	1.83	1.71	0.45	0.79	15	0.33	0.56	2.16
37	1.17	2.01	0.38	1.65	0.58	4.27	1.71	0.45	1.57	95	2.36	0.22	4.37
38	0.58	3.97	0.38	1.22	0.94	8.54	1.71	0.45	1.57	70	2.32	0.15	8.64
39	0.85	1.71	0.38	1.30	0.25	1.22	1.71	0.45	1.57	94	1.46	0.48	1.37
40	0.43	3.41	0.38	1.03	0.59	6.10	1.71	0.45	1.57	73	1.46	0.16	6.17
41	0.39	3.77	0.38	0.78	1.05	5.49	1.71	0.45	1.57	45	1.46	0.25	5.67
42	0.35	4.22	0.38	0.60	1.43	4.88	1.71	0.45	1.57	24	1.48	0.36	5.20
43	0.16	3.90	0.38	0.79	0.31	4.27	1.71	0.45	1.57	68	0.62	0.16	4.32
44	0.20	2.96	0.38	0.58	0.47	3.05	1.71	0.45	1.57	42	0.59	0.27	3.17
45	0.18	3.27	0.38	0.48	0.64	3.05	1.71	0.45	1.57	20	0.58	0.32	3.21
46	0.16	3.74	0.38	0.39	0.88	4.27	1.71	0.45	1.57	1	0.60	0.29	4.45
47	0.31	0.91	0.38	0.71	0.28	0.61	1.71	0.45	1.57	91	0.29	0.83	0.90
48	0.22	1.39	0.38	0.60	0.14	3.05	1.71	0.45	1.57	70	0.30	0.17	3.09
49	0.12	2.45	0.38	0.51	0.18	3.05	1.71	0.45	1.57	42	0.31	0.18	3.10
50	0.11	2.61	0.38	0.44	0.28	1.83	1.71	0.45	1.57	20	0.29	0.35	1.94
51	0.09	3.20	0.38	0.29	1.39	1.22	1.71	0.45	1.57	1	0.30	0.97	2.15
52	0.26	1.13	0.08	0.45	0.23	1.22	1.71	0.45	1.57	95	0.29	0.24	1.26
53	0.14	2.09	0.08	0.29	0.36	1.83	1.71	0.45	1.57	70	0.29	0.23	1.88
54	0.12	2.45	0.08	0.24	0.46	2.44	1.71	0.45	1.57	50	0.30	0.22	2.50
55	0.46	1.34	0.08	0.78	0.11	0.61	1.71	0.45	1.57	94	0.62	0.29	0.64
56	0.17	3.71	0.08	0.47	0.40	2.44	1.71	0.45	1.57	70	0.63	0.19	2.48
57	0.22	2.68	0.08	0.37	0.53	3.05	1.71	0.45	1.57	56	0.59	0.20	3.11
58	1.01	1.46	0.08	1.18	0.29	1.83	1.71	0.45	1.57	94	1.47	0.20	1.86
59	0.38	3.86	0.08	0.69	0.77	4.27	1.71	0.45	1.57	70	1.45	0.20	4.35
60	0.25	1.36	0.23	0.48	0.12	1.83	1.71	0.45	1.57	71	0.34	0.19	1.86
61	0.14	2.50	0.23	0.38	0.21	1.83	1.71	0.45	1.57	44	0.34	0.24	1.88
62	0.12	2.80	0.23	0.29	0.42	1.83	1.71	0.45	1.57	19	0.32	0.34	1.94
63	0.62	0.94	0.23	0.87	0.17	1.83	1.71	0.45	1.57	95	0.59	0.22	1.87
64	0.35	1.66	0.23	0.58	0.40	3.66	1.71	0.45	1.57	70	0.58	0.17	3.71
65	0.20	2.92	0.23	0.45	0.52	3.66	1.71	0.45	1.57	45	0.59	0.20	3.73
66	0.19	3.11	0.23	0.39	0.62	2.44	1.71	0.45	1.57	33	0.59	0.33	2.58
67	1.10	1.34	0.23	1.34	0.37	3.05	1.71	0.45	1.57	93	1.47	0.19	3.11
68	0.34	4.45	0.23	0.89	0.70	4.88	1.71	0.45	1.57	74	1.53	0.19	4.96
69	0.40	3.59	0.23	0.67	1.04	4.27	1.71	0.45	1.57	49	1.44	0.29	4.45
70	1.08	1.34	0.00	1.15	0.28	1.83	1.71	0.45	1.57	94	1.45	0.15	1.85
71	0.31	4.65	0.00	0.65	0.70	3.05	1.71	0.45	1.57	70	1.45	0.23	3.13
72	0.67	0.88	0.00	0.70	0.16	0.61	1.71	0.45	1.57	94	0.59	0.25	0.63
73	0.21	2.84	0.00	0.33	0.52	3.05	1.71	0.45	1.57	61	0.60	0.17	3.09
74	1.18	2.01	0.00	1.19	0.60	3.05	1.71	0.45	1.57	89	2.37	0.19	3.11
75	0.54	3.79	0.00	0.79	0.89	4.27	1.71	0.45	1.57	62	2.04	0.21	4.36
76	1.18	1.89	0.08	1.30	0.47	3.05	1.71	0.45	1.57	91	2.23	0.18	3.10
77	0.56	3.89	0.08	0.90	1.16	6.10	1.71	0.45	1.57	70	2.18	0.20	6.22
78	1.16	1.98	0.23	1.41	0.59	3.66	1.71	0.45	1.57	91	2.31	0.22	3.75
79	0.61	4.05	0.23	1.05	0.94	6.10	1.71	0.45	1.57	68	2.45	0.19	6.21
80	1.13	2.16	0.23	1.47	0.59	4.27	1.71	0.45	0.32	91	2.44	0.19	4.35
81	1.10	1.34	0.23	1.35	0.30	1.83	1.71	0.45	0.32	94	1.47	0.28	1.90
82	0.42	3.36	0.23	0.85	0.71	4.27	1.71	0.45	0.32	70	1.42	0.22	4.37
83	0.62	0.94	0.23	0.99	0.15	1.22	1.71	0.45	0.32	96	0.59	0.30	1.28
84	0.24	2.53	0.23	0.58	0.57	2.44	1.71	0.45	0.32	71	0.61	0.32	2.56
85	0.19	2.91	0.23	0.44	1.52	5.49	1.71	0.45	0.32	44	0.55	0.31	5.76
86	0.16	2.08	0.23	0.46	0.48	2.44	1.71	0.45	0.32	69	0.33	0.28	2.54
87	0.13	2.41	0.23	0.37	0.56	2.44	1.71	0.45	0.32	44	0.32	0.31	2.56
88	0.11	2.65	0.23	0.28	0.97	3.66	1.71	0.45	0.32	18	0.29	0.32	3.85

نتايج حاصل از جدول (۳-۳)، با مجموعه داده‌هاي تجربی ديگر تركيب می‌شوند، تا زاویه پخشیدگی جت β' را تعیین کنند. تاراپور (Tarapore, 1956) به نقل از مرجع (۱۰) و راجاراتنام (Rajaratnam, 1981) به نقل از مرجع (۱۰)، اندازه‌ای از β' برای جت‌های مستغرق عمیق بدست آوردند، در صورتی که جدول (۳-۳)، اعماق پایایی که از عمق جریان ورودی فراتر نرفته‌اند، را پوشش می‌دهد. مجموعه داده‌ها شامل صد و نه نقطه داده، طیف گسترده‌ای از شرایط استغراق را برای جت‌های دیواری متصل با ارتفاع شیب‌شکن متغیر و برای جت‌های دیواری با ارتفاع شیب‌شکن ناچیز را، پوشش می‌دهند. زاویه β' برحسب رادیان، با استفاده از تحلیل رگرسیونی به صورت زیر بدست می‌آید.

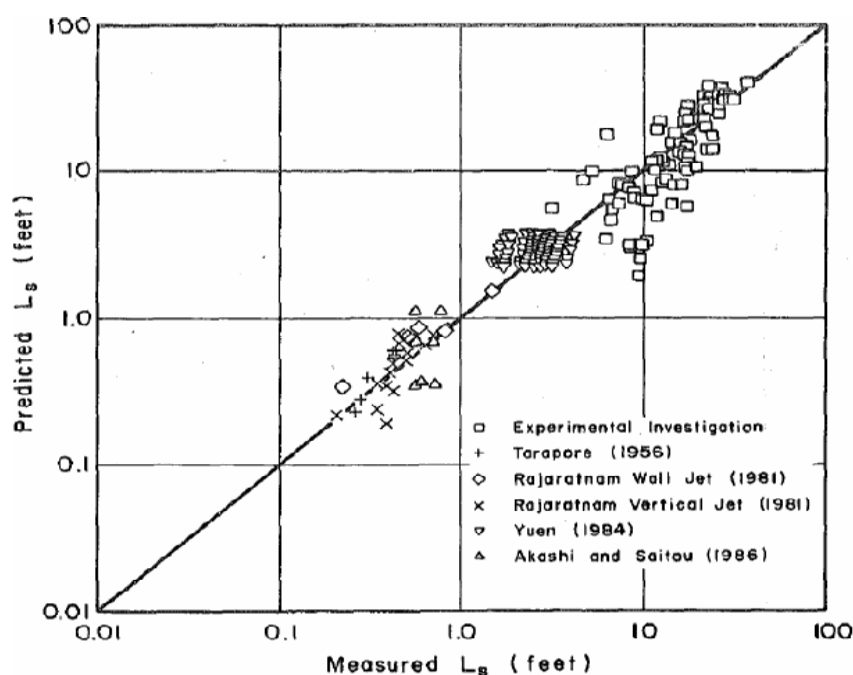
$$\beta' = 0.316 \sin \lambda + 0.15 \ln \left(\frac{D_p + Y_0}{Y_0} \right) + 0.13 \ln \left(\frac{Y_t}{Y_0} \right) - 0.05 \ln \left(\frac{U_0}{\sqrt{gY_0}} \right) \quad (17-3)$$

مقدار ضرائب این معادله رگرسیونی ($R^2=0.906$) و خطای میانگین تنظیمی برابر (0.074)، نشان می‌دهد که β' در درجه اول با زاویه شیب وجه افزایش می‌یابد و با ارتفاع شیب‌شکن، عمق پایاب و عدد فرود تقارب، به طور جزئی تغییر می‌کند. شکل (۷-۳)، نتایج معادله (۱۷-۳) را با مقادیر مشاهده شده برای جت‌های دیواری متصل مستغرق، مقایسه می‌کند. متوسط خطای پیش‌بینی تنظیم شده برای β' کمتر از ۰/۱ رادیان (تقریباً ۵ درجه) می‌باشد و فقط شش نقطه داده‌ها آنسوی باند خطای $\pm 10^\circ$ ، واقع شده‌اند.



شکل (۷-۳) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده زاویه جت β' [10]

بعد از تركيب مجموعه داده‌هاي جدول (۳-۳) با اندازه‌گيري‌هاي عمق آبستگي متعادل حاصل تحقيقات منتشر شده ساير محققين، مجموع دويست و سي و يك مشاهده در تنوعی گسترده از شرايط جريان و شكل‌هاي سازه، برای امتحان قابليت کاربرد معادلات (۳-۱۳) و (۳-۱۴)، در دسترس بود. شرايط جريان، شامل جت‌هاي عمودي، جت‌هاي ديواري، جت‌هاي ريزشي آزاد، جت‌هاي مستغرق و جريان مستغرق جزئي بر سازه‌هاي شيب‌شكن مقياس بزرگ با شيب وجه عمودي و مايل ($1H:1V$ و $3H:1V$) می‌شود. شكل (۳-۸)، طول‌هاي پخشيدگي L_s مشاهده شده، با مقادير تئوري محاسبه شده از معادله (۳-۱۳)، را مقايسه می‌کند.



شكل (۳-۸) مقايسه مقادير محاسبه شده و اندازه‌گيري شده طول پخشيدگي L_s [10]

مقادير عددي پارامترهاي زير بر مبنای ارزيابي جريان مربوط و شرايط ذره انتخاب شده‌اند:

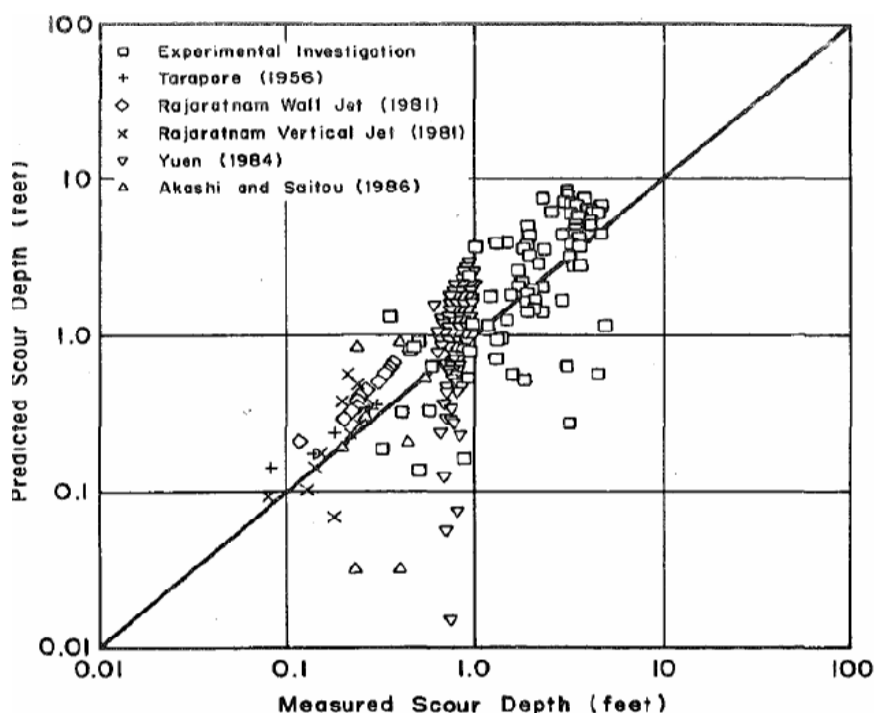
$$x = 0.5, \alpha = \beta', \gamma_s = 2.7\gamma, B = 2.0, d_s = d_{90}, C_d = 1.8, \phi = 25^\circ$$

لازم به ذکر است پارامتر $x=0.5$ ، مقادير توان‌هاي معادله (۳-۱۳) را که قبلاً در جدول (۳-۳) بحث

شده بود را تعيين می‌کند. بنابراین معادله (۳-۱۴) به صورت ساده شده و نهايی زير در خواهد آمد:

$$D_s = \left[\frac{0.611}{[\sin(0.436 + \beta')]^{0.8}} \frac{q^{0.6} U_0}{g^{0.8} d_{90}^{0.4}} \sin \beta' \right] - D_p \quad (18-3)$$

همه پارامترها، قبلاً تعریف شده‌اند (با توجه به شکل (۳-۲)) و در سیستم متریک می‌باشند. β' بر حسب رادیان می‌باشد و از رابطه (۳-۱۷)، محاسبه می‌شود. پارامترهای باقی مانده، بر طول پخشیدگی L_s و عمق آبشستگی D_s ، فقط از طریق پارامتر K بواسطه معادله (۳-۱۵)، تأثیر می‌کنند. مقادیر یکسان K ، می‌تواند با مجموعه‌ای متفاوت از پارامترها بدست آید. شکل (۳-۹)، اعماق آبشستگی مشاهده شده را با اعماق آبشستگی محاسبه شده از معادله (۳-۱۴)، مقایسه می‌کند.



شکل (۳-۹) مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده عمق آبشستگی D_s [10]

از شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) پیداست، که طول پخشیدگی L_s می‌تواند با دقت بیشتر از عمق آبشستگی D_s ، تعیین شود. این نتیجه مورد انتظار از این واقعیت حاصل می‌شود که عمق آبشستگی از معادله (۳-۱۴)، به مقادیر کم زاویه β' حساس است. تحقیقات بیشتر روی منطقه جدایی، اثر کواندا و ناپایداری طبیعی و نوسان‌های جت‌های ورودی^۱، ممکن است از نظر تئوری، برآوردهای بهتری از β' را فراهم کنند.

۳-۳-۶- نتايج بدست آمده از تحقيق بورمن و ژولين

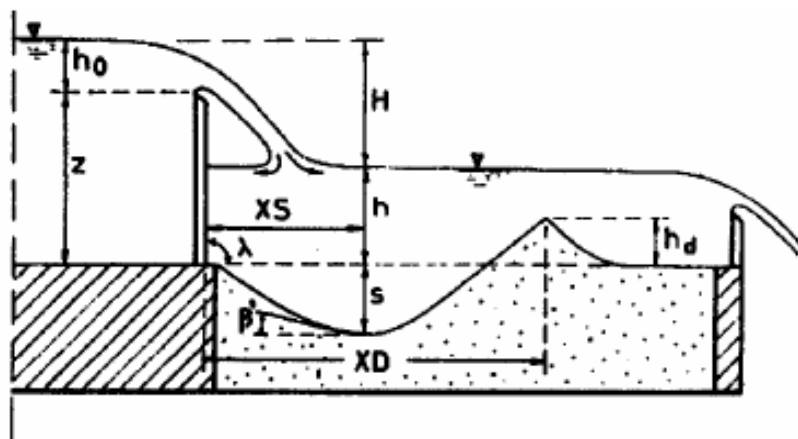
آبستگي موضعي پايين دست سازه‌هاي کنترل شيب، از لحاظ تئوري بوسيله تشابه بين فرآيند آبستگي موضعي و پخشيدگي جت در گوداب ورودی^۱، مورد بررسی قرار گرفت. بعد از بررسی مسير حرکت جت، پخشيدگي جت و پايداري ذرات رسوب در چاله آبستگي، اين نتيجه بدست آمد که توان‌هاي رابطه عمق آبستگي متعادل پيشنهاده شده (معادله ۳-۱۴))، با روابط تجربی مندرج در جدول (۳-۲)، مطابقت خوبی دارند. آزمايش‌هاي بزرگ مقياس، به طور قابل ملاحظه‌اي، محدوده شرايط داده‌هاي آبستگي موضعي موجود را توسعه می‌دهند. اعماق آبستگي بيش از ۱/۴ متر، در دبي واحد (m^2/s) ۲/۵ اندازه‌گيري شدند. تحليل دويست و سي و يک اندازه‌گيري عمق آبستگي، نشان می‌دهد که طول پخشيدگي جت در شکل (۳-۸)، می‌تواند با دقت قابل قبول تعيين شود، بطوريکه معادله (۳-۱۷)، زاويه جت β' را با خطای پيش‌بيني ميانگين، در حدود $\pm 5^\circ$ تعيين می‌کند. اين موضوع، پراکندگي نشان داده شده در شکل (۳-۹) برای عمق آبستگي متعادل محاسبه شده از معادله (۳-۱۴)، را توضيح می‌دهد. تطابق بين اعماق آبستگي اندازه‌گيري شده و محاسبه شده از معادله (۳-۱۴)، قابل قبول است. گستره متنوعي از انواع جت‌ها، شامل جت‌هاي عمودي، جت‌هاي ديواري، جت‌هاي ريزشي آزاد، جت‌هاي مستغرق و جريان روی سازه‌هاي کنترل شيب بزرگ مقياس، در شکل (۳-۹) نشان داده شده‌اند.

۳-۴- بررسی روابط ارائه شده توسط دی آگوستینو و فرو

دی آگوستینو و فرو در سال (۲۰۰۴)، روابطی برای محاسبه عمق آبشستگی و متغیرهای دیگر آبشستگی، پایین دست سازه‌های کنترل شیب ارائه کردند. روابط آنها بر اساس آنالیز ابعادی و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبره کردن معادلات پیشنهادی، استوار می‌باشد.

۳-۴-۱- خودتشابهی^۱ برای پدیده آبشستگی [8]

سازه کنترل شیب نشان داده شده در شکل (۳-۱۰)، با سرریزی لبه تیز، در نظر گرفته شود. جریان آب پایین دست سازه کنترل شیب، باعث ایجاد آبشستگی موضعی می‌شود. هنگامی که نرخ آبشستگی به صفر نزدیک می‌شود، این حالت، حالت تعادل فرض می‌شود و با عمق آبشستگی بیشینه s مشخص می‌شود.



شکل (۳-۱۰) طرح آبشستگی بستر آبرفتی، پایین دست سازه کنترل شیب (دی آگوستینو و فرو ۲۰۰۴) [8]

برای سرریز لبه تیز نشان داده شده در شکل (۳-۱۰)، رابطه هندسی زیر بین افت H ، از بالادست تا تراز پایاب (اختلاف هد پیزومتریک)، ارتفاع ریزش z ، عمق آب پایین دست سرریز h و هد کل h_0 که از انتهای سرریز اندازه‌گیری می‌شود، برقرار است:

$$\frac{H}{h} = \frac{z}{h} + \frac{h_0}{h} - 1 \quad (۳-۱۹)$$

با در نظر گرفتن معادله (۳-۱۹)، براي سرريز لبه تيز، رابطه دبی اشل^۱ به صورت زیر بيان می‌شود
(Ferro, 2000 به نقل از مرجع ۸):

$$f(h_0, Q, z, B, b, g, \mu) = 0 \quad (۳-۲۰)$$

f نماد تابع، B عرض کانال، g شتاب ثقل و μ ویسکوزیته آب می‌باشد.

پدیده آبستگي، ناشی از رفتار فرسایشی جریان آب، به صورت رابطه تابعی زیر بیان می‌شود:

$$F(y, z, b, B, h, Q, \rho_s, \rho, g, d_{50}, d_{90}) = 0 \quad (۳-۲۱)$$

F نماد تابع، y متغیر آبستگي (بیشترین عمق آبستگي s یا طول افقی آن XS ، ρ_s, ρ به ترتیب دانسیته جرمی آب و رسوبات و d_{90}, d_{50} به ترتیب، قطری می‌باشند که ۵۰٪ و ۹۰٪ ذرات از آن ریزتراند. ضریب انقباض جت در معادله (۳-۲۱)، معرفی نشده است، زیرا به نسبت b/B و h_0/z وابسته است. ضریب دانه‌بندی که معمولاً برای مشخص کردن غیریکنواختی رسوبات بکار می‌رود، بوسیله نسبت d_{50}/d_{90} بدون کم شدن قابل توجه دقت، جایگزین می‌شود.

از این رو، رابطه تابعی (۳-۲۱)، پدیده‌های فیزیکی را نشان می‌دهد که وابسته به انتخاب واحد اندازه‌گیری نمی‌باشد. طبق تئوری پی باکینگهام (Barenblatt, 1987 به نقل از مرجع ۸)، معادله (۳-۲۱) در شکل بی‌بعد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) \quad (۳-۲۲)$$

$\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_8$ گروه‌های بی‌بعد می‌باشند و Φ نماد تابع است.

با انتخاب متغیرهای مستقل ابعادی z, Q و ρ ، گروه‌های بی‌بعد زیر نتیجه می‌شوند:

$$\Pi_1 = \frac{y}{z} \quad (۳-۲۳-الف)$$

$$\Pi_2 = \frac{b}{z} \quad (۳-۲۳-ب)$$

$$\Pi_3 = \frac{B}{z} \quad (۳-۲۳-ج)$$

$$\Pi_4 = \frac{h}{z} \quad (۳-۲۳-د)$$

$$\Pi_5 = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \quad (۳-۲۳-ه)$$

$$\Pi_6 = \frac{gz^5}{Q^2} \quad (۳-۲۳-و)$$

$$\Pi_7 = \frac{d_{50}}{z} \quad (3-23 \text{ ز})$$

$$\Pi_8 = \frac{d_{90}}{z} \quad (3-23 \text{ خ})$$

با در نظر گرفتن معادلات (3-23 ب) و (3-23 ج)، گروه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\Pi_2}{\Pi_3} = \frac{b}{B} \quad (3-24)$$

با در نظر گرفتن معادلات (3-19) و (3-20)، گروه بی‌بعد Π_4 می‌تواند بوسیله نسبت $\frac{h}{H}$ ، جایگزین

شود. با ترکیب معادلات (3-23 ب)، (3-23 ه)، (3-23 و) و (3-23 ز)، گروه بی‌بعد A_{50} به صورت زیر بدست می‌آید:

$$A_{50} = \frac{1}{\Pi_2} \left(\frac{1}{\Pi_5 \Pi_6 \Pi_7} \right)^{1/2} = \frac{Q}{bz \left[gd_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{1/2}} \quad (3-25)$$

ترکیبی از معادلات (3-23 ز) و (3-23 خ)، گروه بی‌بعد زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\frac{\Pi_8}{\Pi_7} = \frac{d_{90}}{d_{50}} \quad (3-26)$$

نهایتاً، رابطه (3-22) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{y}{z} = \Phi \left(\frac{b}{z}, \frac{h}{H}, A_{50}, \frac{d_{90}}{d_{50}}, \frac{b}{B} \right) \quad (3-27)$$

شکل ریاضی معادله (3-27)، با استفاده از تئوری خودتشابهی استنباط می‌شود

(Barenblatt, 1979, 1987; Ferro, 1997) به نقل از مرجع ۸). یک پدیده، هنگامی به عنوان خودتشابه

در گروه بی‌بعد معلوم Π_n تعریف می‌شود، که رابطه تابعی $\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n)$ ، نماینده پدیده

فیزیکی مستقل از Π_n باشد.

هنگامی که تابع Φ ، حد صفر یا بی‌نهایت داشته باشد، پدیده بوسیله رابطه تابعی زیر بیان می‌شود:

$$\Pi_1 = \Pi_n^\epsilon \Phi_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}) \quad (3-28)$$

Φ_1 نماد تابع و ϵ ثابت عددی می‌باشد. این مورد، خودتشابهی ناقص^۱ (*ISS*) در پارامتر Π_n نامیده

می‌شود (Barenblatt, 1979, 1987) به نقل از مرجع ۸).

با بكار بردن شرط (ISS)، براي گروه‌هاي b/z ، h/H ، A_{50} ، d_{90}/d_{50} و b/B معادله زير نتيجه مي‌شود:

$$\Pi_1 = \frac{y}{z} = a_1 \left(\frac{b}{z}\right)^{a_2} \left(\frac{h}{H}\right)^{a_3} (A_{50})^{a_4} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{a_5} \left(\frac{b}{B}\right)^{a_6} \quad (29-3)$$

ثابت‌هاي عددي براي ارزيابي تجربي مي‌باشند. $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$

معادله (۲۹-۳)، بوسيله $\Pi_1 = s/z$ مي‌تواند براي تعيين عمق آبستگي، يا بوسيله $\Pi_1 = XS/z$ براي محاسبه طول افقي مربوط به بيشترين عمق آبستگي، انتخاب شود.

آبستگي پايين دست سازه کنترل شيب، پشته‌اي^۱ به ارتفاع بيشينه h_D و فاصله از سرريز XD را توليد مي‌کند. ارتفاع h_D و طول افقي XD ، مي‌توانند بطور تئوري با استفاده از معادله‌اي مثل معادله (۲۹-۳) که بترتيب $\Pi_1 = h_D/z$ و $\Pi_1 = XD/z$ مي‌باشند، برقرار شوند.

۳-۴-۲- مجموعه داده‌هاي آزمائشگاهي مورد استفاده براي کالبراسيون

معادلات پيشنهادي

براي ارزيابي معادلات خودتشابهي مرتبط با تخمين عمق آبستگي بيشينه (معادله (۲۹-۳))، از داده‌هاي موجود ورونس (*Veronese, 1937*) به نقل از مرجع (۸)، بورمن و ژولين (۱۹۹۱)، دي آگوستينو (۱۹۹۴) و موسي (*Mossa, 1998*) به نقل از مرجع (۸) استفاده شده است.

ورونس، تعدادي آزمائش با استفاده از فلومي با طرح اوليه نشان داده شده در شکل (۳-۱۰) انجام داد. نسبت بين عرض سرريز b و عرض کانال B برابر ۱ تنظيم شد ($b = B = 0.5m$). اختلاف بين ارتفاع بالادست و پايين دست تراز آب برابر $H = 1$ متر تنظيم شد. آزمائش‌ها (جدول (۳-۴)) با قرار دادن چهار مخلوط تقريباً يکنواخت با قطر ميانگين d_m برابر $36/2$ ، 21 ، $14/2$ و $9/1$ ميلي‌متر در کف فلوم انجام شد. در تحليل حاضر، فرض مي‌شود که مقدار d_m با مقدار d_{50} مساوي است و نسبت بين دانسيته جرمي رسوبات و دانسيته جرمي آب برابر $2/7$ در نظر گرفته مي‌شود. دبي‌هاي آزمائشگاهي در محدوده 0.001 تا $0.083 (m^2/s)$ ، اعماق آبستگي بيشينه‌اي بين 0.055 تا 0.22 متر، توليد مي‌کنند [8].

جدول (۳-۴) داده‌های آزمایشگاهی ورونس (۱۹۳۷) ($b = B = 0.5m$) [8]

Run	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	d_m (m)	s (m) Eq. (18)	s (m) Eq. (3) ^a	s (m) Eq. (32)
1	1.025	0.075	0.100	0.0374	0.065	0.0362	NA	0.132	0.092
2	1.053	0.092	0.145	0.0516	0.060	0.0362	NA	0.153	0.104
3	1.056	0.104	0.160	0.0620	0.070	0.0362	NA	0.177	0.113
4	1.072	0.118	0.190	0.0744	0.080	0.0362	NA	0.196	0.122
5	1.134	0.081	0.215	0.0420	0.060	0.0362	NA	0.064	0.087
6	1.144	0.071	0.215	0.0350	0.085	0.0362	NA	0.036	0.079
7	1.118	0.107	0.225	0.0646	0.100	0.0362	NA	0.139	0.110
8	1.118	0.117	0.235	0.0740	0.110	0.0362	NA	0.162	0.118
9	1.106	0.127	0.233	0.0828	0.120	0.0362	NA	0.191	0.125
10	1.146	0.064	0.210	0.0300	0.055	0.021	NA	0.030	0.084
11	1.133	0.087	0.220	0.0472	0.100	0.021	NA	0.097	0.108
12	1.138	0.102	0.240	0.0596	0.105	0.021	NA	0.130	0.121
13	1.141	0.109	0.250	0.0658	0.110	0.021	NA	0.144	0.127
14	1.136	0.114	0.250	0.0711	0.120	0.021	NA	0.163	0.132
15	1.040	0.052	0.092	0.0216	0.050	0.021	NA	0.083	0.079
16	1.057	0.073	0.130	0.0364	0.065	0.021	NA	0.121	0.101
17	1.048	0.087	0.135	0.0474	0.080	0.021	NA	0.161	0.116
18	1.061	0.099	0.160	0.0570	0.090	0.021	NA	0.179	0.125
19	1.032	0.108	0.140	0.0650	0.120	0.021	NA	0.219	0.137
20	1.022	0.118	0.140	0.0746	0.140	0.021	NA	0.250	0.148
21	1.112	0.053	0.165	0.0224	0.055	0.0142	NA	0.038	0.083
22	1.110	0.075	0.185	0.0376	0.095	0.0142	NA	0.096	0.108
23	1.108	0.092	0.200	0.0512	0.110	0.0142	NA	0.142	0.127
24	1.143	0.107	0.250	0.0646	0.110	0.0142	NA	0.156	0.140
25	1.014	0.036	0.050	0.0123	0.080	0.0142	NA	0.068	0.070
26	1.018	0.052	0.070	0.0221	0.100	0.0142	NA	0.107	0.093
27	1.021	0.069	0.090	0.0331	0.120	0.0142	NA	0.144	0.112
28	1.018	0.082	0.100	0.0428	0.130	0.0142	NA	0.177	0.127
29	1.008	0.092	0.100	0.0512	0.170	0.0142	NA	0.208	0.140
30	1.000	0.100	0.100	0.0578	0.180	0.0142	NA	0.231	0.150
31	0.982	0.108	0.090	0.0650	0.200	0.0142	NA	0.259	0.163
32	1.046	0.054	0.100	0.0229	0.100	0.0091	NA	0.099	0.102
33	1.037	0.063	0.100	0.0290	0.120	0.0091	NA	0.129	0.116
34	1.047	0.083	0.130	0.0440	0.160	0.0091	NA	0.176	0.140
35	1.025	0.095	0.120	0.0536	0.180	0.0091	NA	0.220	0.158
36	0.987	0.103	0.090	0.0607	0.220	0.0091	NA	0.261	0.177

^aEq. (3) applied with $d_s = d_m$ diameters used in the model; NA=not applicable (negative values).

بورمن و ژولین (۱۹۹۱) [10]، بطور تئوریک پدیده آبستنگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب دارای شیب وجه پایین دست، را بررسی کردند. آنها تحقیق آزمایشگاهی بزرگ مقیاسی، با دبی‌های واحد در محدوده 0.3 تا 2.5 متر مربع بر ثانیه و اعماق آبستنگی بیشینه‌ای در محدوده 0.10 تا $1/40$ متر، انجام دادند. آزمایش‌ها در فلوم خارجی بزرگی ($B = 0.91m, b/B = 1$)، در مرکز تحقیقات مهندسی دانشگاه ایالتی کلرادو انجام شد. تراز مدل سازه کنترل شیب، $2/13$ متر بالای کف فلوم تنظیم شد و سه زاویه پایین دست سازه ($\lambda = 1.57, 0.79, 0.32rad$)، استفاده شد. بستر متحرک، با استفاده از دو مخلوط مختلف با ($d_{50} = 0.3mm, d_{90} = 1.58mm$) و ($d_{50} = 0.45mm, d_{90} = 1.71mm$)، تشکیل شد. نسبت ρ_s / ρ برابر $2/7$ فرض شد. مجموعه داده‌ها، شامل بیشترین عمق آبستنگی s و طول افقی آن XS ، می‌شود (جدول (۳-۳)).

موسی (۱۹۹۸) [8]، نوزده آزمایش را با مدل کردن سازه کنترل شیب با دو وضعیت شیب وجه پايين دست سازه $(\lambda = 0.79, 0.32rad)$ ، انجام داد (جدول (۳-۵)). کانال آزمایشگاهی ۰/۳ متر عرض داشت و همیشه نسبت $b/B = 1$ ، استفاده می‌شد. بستر متحرک، با استفاده از مخلوطی با توزیع دانه‌بندی شبه‌یکنواخت با $d_{50} = 2mm$ و نسبت ρ_s/ρ برابر با ۲/۶۵، برقرار شد. دبي‌های آزمایشی در محدوده‌ای از ۰/۰۴۵ تا ۰/۱۴۸ (m^2/s) ، بیشترین اعماق آبستگي متغیر بین ۰/۰۳۵۲ و ۰/۱۴۵ متر را تولید کردند. همچنین مجموعه داده‌های موسی، شامل مقادیر طول XS که در بیشترین عمق آبستگي اتفاق می‌افتد، می‌شود.

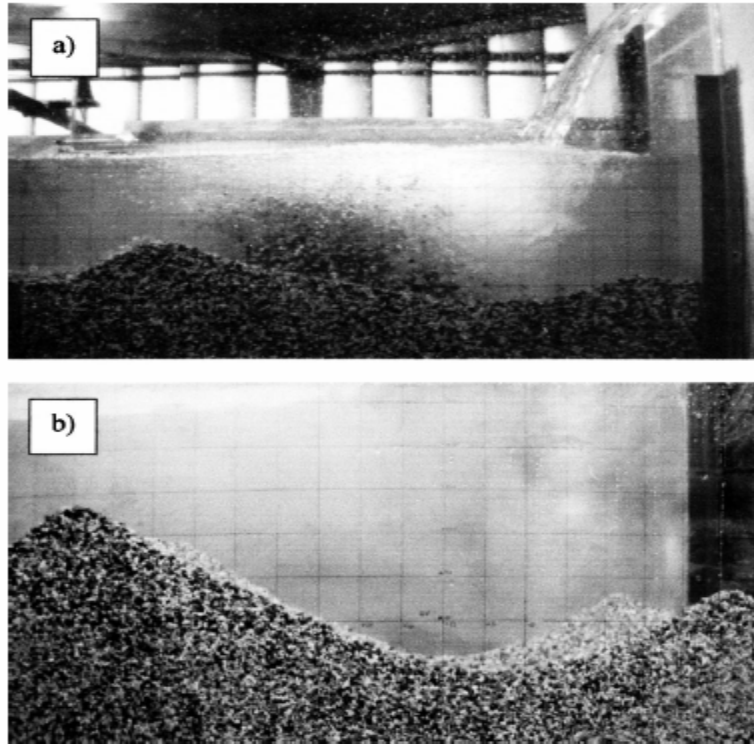
جدول (۳-۵) داده‌های آزمایشگاهی موسی (۱۹۹۸) $(b = B = 0.3m)$ [8]

Run	λ	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	XS (m)	d_{50} (m)	s (m) Eq. (18)	s (m) Eq. (3) ^a	s (m) Eq. (32)
1	0.785	0.090	0.035	0.030	0.0073	0.090	0.190	0.002	NA	0.072	0.074
2	0.785	0.090	0.038	0.065	0.0087	0.082	0.190	0.002	NA	0.063	0.071
3	0.785	0.090	0.047	0.080	0.0091	0.060	0.170	0.002	NA	0.056	0.070
4	0.785	0.090	0.039	0.057	0.0097	0.096	0.200	0.002	NA	0.077	0.077
5	0.785	0.090	0.043	0.073	0.0106	0.093	0.200	0.002	NA	0.074	0.077
6	0.785	0.090	0.046	0.034	0.0113	0.125	0.250	0.002	NA	0.102	0.094
7	0.785	0.090	0.053	0.072	0.0135	0.115	0.240	0.002	NA	0.097	0.090
8	0.785	0.090	0.056	0.085	0.0147	0.098	0.210	0.002	NA	0.098	0.090
9	0.785	0.090	0.056	0.067	0.0148	0.126	0.230	0.002	NA	0.110	0.097
10	0.785	0.090	0.056	0.077	0.0148	0.109	0.210	0.002	NA	0.104	0.093
11	0.314	0.090	0.021	0.025	0.0045	0.035	0.380	0.002	NA	0.050	0.058
12	0.314	0.090	0.033	0.030	0.0087	0.088	0.540	0.002	NA	0.084	0.082
13	0.314	0.090	0.035	0.081	0.0098	0.050	0.430	0.002	NA	0.062	0.070
14	0.314	0.090	0.039	0.034	0.0109	0.105	0.560	0.002	NA	0.099	0.091
15	0.314	0.090	0.040	0.061	0.0117	0.075	0.470	0.002	NA	0.091	0.085
16	0.314	0.090	0.044	0.035	0.0129	0.137	0.670	0.002	NA	0.112	0.100
17	0.314	0.090	0.043	0.086	0.0136	0.062	0.460	0.002	NA	0.089	0.084
18	0.314	0.090	0.047	0.079	0.0141	0.086	0.470	0.002	NA	0.097	0.089
19	0.314	0.090	0.047	0.062	0.0144	0.145	0.590	0.002	NA	0.110	0.095

^aEq. (3) applied with $d_s = d_{50}$ used in the mode; NA=not applicable (negative values).

دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) [8]، تحقیق آزمایشگاهی (۱۱۴ آزمایش) با استفاده از طرح اولیه نمایش داده شده در شکل (۳-۱۰) انجام داد. کانال آزمایشی ۰/۵ متر عرض داشت و آزمایش‌ها با انتخاب دو مقدار نسبت b/B (۰/۳ و ۰/۶) و دو مقدار ارتفاع سرریز (۰/۴۱ و ۰/۷۱) و دو مخلوط متفاوت شنی برای تولید مجدد بستر آبرفتی، انجام شدند. هر دو توزیع دانه‌بندی بستر، کاملاً گسترده بودند و بترتیب، $(d_{50} = 4.1mm, d_{90} = 7.0mm)$ و $(d_{50} = 11.5mm, d_{90} = 17.6mm)$ بودند. مقدار ρ_s/ρ برابر ۲/۷ در نظر گرفته شد. دبي‌های واحد عرض آزمایشی از ۰/۰۱۶۷ تا ۰/۱۶۷ (m^2/s) ، بیشترین اعماق آبستگي متغیر بین ۰/۰۴۵ و ۰/۲۸۵ را تولید کردند.

بعلاوه، براي بيشتري عمق آبستگي، دي آگوستينو (۱۹۹۴) [8]، طول افقي آن XS ، بيشتري ارتفاع تلماسه ته نشين شده h_D و فاصله تاج تلماسه از سرريز XD را اندازه گرفت. در طي مدت انجام آزمايش‌ها، براي رسيدن به حالت آبستگي متعادل، ارتفاع تلماسه و انتقال رسوبات پايين دست تلماسه، کنترل مي شدند. زمان تغييرناپذيري ارتفاع تلماسه و نبود انتقال رسوبات پايين دست تلماسه به عنوان فاکتورهاي اثبات شرايط آبستگي متعادل در نظر گرفته شدند (شکل (۱۱-۳)). مجموعه کامل داده‌هاي اين آزمايش‌ها در جدول (۳-۶) خلاصه شده‌اند.



شکل (۱۱-۳) بالا: نمایی از آبستگي در طي انجام آزمايش، پايين: رسيدن به حالت تعادل آبستگي [8]

جدول (۳-۶) داده‌هاي آزمایشگاهی دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) ($B = 0.5m$) [8]

Run	b (m)	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	XS (m)	h_d (m)	XD (m)	d_{50} (m)	d_{90} (m)	s (m) Eq. 18	s (m) Eq. 3 ^a	s (m) Eq. 32
1	0.30	0.71	0.044	0.083	0.0167	0.057	0.240	0.030	0.490	0.0041	0.007	NA	0.092	0.075
2	0.30	0.71	0.044	0.086	0.0167	0.060	0.240	0.030	0.490	0.0041	0.007	NA	0.090	0.075
3	0.30	0.71	0.044	0.191	0.0167	0.065	0.255	0.050	0.510	0.0041	0.007	NA	0.008	0.066
4	0.30	0.71	0.044	0.239	0.0167	0.086	0.260	0.060	0.530	0.0041	0.007	NA	NA	0.063
5	0.30	0.71	0.044	0.244	0.0167	0.090	0.265	0.055	0.530	0.0041	0.007	NA	NA	0.063
6	0.30	0.71	0.044	0.326	0.0167	0.090	0.285	0.070	0.590	0.0041	0.007	NA	NA	0.060
7	0.30	0.71	0.071	0.103	0.0333	0.085	0.350	0.065	0.715	0.0041	0.007	NA	0.171	0.106
8	0.30	0.71	0.071	0.119	0.0333	0.083	0.395	0.078	0.750	0.0041	0.007	NA	0.161	0.104
9	0.30	0.71	0.071	0.211	0.0333	0.095	0.430	0.065	0.725	0.0041	0.007	NA	0.095	0.095
10	0.30	0.71	0.071	0.349	0.0333	0.105	0.355	0.070	0.750	0.0041	0.007	NA	NA	0.086
11	0.30	0.71	0.071	0.385	0.0333	0.095	0.370	0.080	0.760	0.0041	0.007	NA	NA	0.084
12	0.30	0.71	0.093	0.228	0.0500	0.116	0.470	0.085	0.910	0.0041	0.007	NA	0.167	0.118
13	0.30	0.71	0.093	0.274	0.0500	0.111	0.525	0.100	0.945	0.0041	0.007	NA	0.133	0.114
14	0.30	0.71	0.093	0.365	0.0500	0.125	0.520	0.080	0.895	0.0041	0.007	NA	0.062	0.107
15	0.30	0.71	0.093	0.400	0.0500	0.120	0.420	0.095	0.910	0.0041	0.007	NA	0.034	0.105
16	0.30	0.71	0.113	0.208	0.0667	0.115	0.460	0.125	1.075	0.0041	0.007	NA	0.254	0.140
17	0.30	0.71	0.113	0.241	0.0667	0.145	0.490	0.115	1.075	0.0041	0.007	NA	0.232	0.137
18	0.30	0.71	0.113	0.325	0.0667	0.130	0.445	0.120	1.025	0.0041	0.007	NA	0.172	0.129
19	0.30	0.71	0.113	0.380	0.0667	0.130	0.505	0.110	1.055	0.0041	0.007	NA	0.130	0.125
20	0.30	0.71	0.131	0.255	0.0833	0.145	0.515	0.160	1.225	0.0041	0.007	NA	0.290	0.153
21	0.30	0.71	0.131	0.276	0.0833	0.175	0.475	0.160	1.190	0.0041	0.007	NA	0.276	0.151
22	0.30	0.71	0.131	0.307	0.0833	0.160	0.520	0.150	1.220	0.0041	0.007	NA	0.255	0.148
23	0.30	0.71	0.131	0.360	0.0833	0.170	0.465	0.152	1.260	0.0041	0.007	NA	0.217	0.143
24	0.30	0.71	0.131	0.400	0.0833	0.175	0.515	0.145	1.160	0.0041	0.007	NA	0.187	0.140
25	0.30	0.71	0.146	0.319	0.1000	0.156	0.575	0.165	1.320	0.0041	0.007	NA	0.311	0.163
26	0.30	0.71	0.146	0.322	0.1000	0.165	0.565	0.170	1.295	0.0041	0.007	NA	0.309	0.163
27	0.30	0.71	0.146	0.354	0.1000	0.155	0.540	0.135	1.260	0.0041	0.007	NA	0.287	0.159
28	0.30	0.71	0.146	0.410	0.1000	0.185	0.505	0.160	1.260	0.0041	0.007	NA	0.247	0.154
29	0.30	0.71	0.162	0.330	0.1167	0.195	0.580	0.190	1.410	0.0041	0.007	NA	0.364	0.177
30	0.30	0.71	0.162	0.370	0.1167	0.203	0.570	0.185	1.410	0.0041	0.007	NA	0.338	0.172
31	0.30	0.71	0.162	0.425	0.1167	0.195	0.560	0.175	1.370	0.0041	0.007	NA	0.300	0.167
32	0.30	0.71	0.176	0.337	0.1333	0.190	0.625	0.210	1.530	0.0041	0.007	NA	0.417	0.190
33	0.30	0.71	0.176	0.380	0.1333	0.210	0.580	0.210	1.490	0.0041	0.007	NA	0.389	0.185
34	0.30	0.71	0.176	0.380	0.1333	0.215	0.540	0.205	1.505	0.0041	0.007	NA	0.389	0.185
35	0.30	0.71	0.176	0.435	0.1333	0.205	0.630	0.180	1.440	0.0041	0.007	NA	0.353	0.179
36	0.30	0.71	0.190	0.400	0.1500	0.255	0.635	0.240	1.650	0.0041	0.007	NA	0.432	0.196
37	0.30	0.71	0.190	0.415	0.1500	0.240	0.640	0.230	1.610	0.0041	0.007	NA	0.423	0.194
38	0.30	0.71	0.205	0.420	0.1667	0.280	0.700	0.250	1.680	0.0041	0.007	NA	0.473	0.206
39	0.30	0.71	0.205	0.435	0.1667	0.285	0.705	0.255	1.705	0.0041	0.007	NA	0.464	0.204
40	0.30	0.41	0.043	0.105	0.0167	0.065	0.215	0.045	0.430	0.0041	0.007	NA	0.079	0.072
41	0.30	0.41	0.043	0.332	0.0167	0.090	0.265	0.055	0.550	0.0041	0.007	NA	NA	0.055
42	0.30	0.41	0.070	0.104	0.0333	0.102	0.300	0.075	0.640	0.0041	0.007	NA	0.174	0.106
43	0.30	0.41	0.070	0.123	0.0333	0.100	0.300	0.075	0.630	0.0041	0.007	NA	0.163	0.103
44	0.30	0.41	0.070	0.159	0.0333	0.110	0.320	0.070	0.645	0.0041	0.007	NA	0.139	0.099
45	0.30	0.41	0.070	0.353	0.0333	0.140	0.370	0.075	0.755	0.0041	0.007	NA	NA	0.080
46	0.30	0.41	0.091	0.174	0.0500	0.130	0.350	0.100	0.820	0.0041	0.007	NA	0.211	0.122
47	0.30	0.41	0.091	0.230	0.0500	0.145	0.370	0.090	0.840	0.0041	0.007	NA	0.173	0.115
48	0.30	0.41	0.091	0.284	0.0500	0.150	0.345	0.095	0.850	0.0041	0.007	NA	0.134	0.109
49	0.30	0.41	0.091	0.365	0.0500	0.165	0.440	0.095	0.900	0.0041	0.007	NA	0.072	0.100
50	0.30	0.41	0.091	0.370	0.0500	0.155	0.420	0.110	0.895	0.0041	0.007	NA	0.068	0.099
51	0.30	0.41	0.091	0.400	0.0500	0.140	0.510	0.095	0.995	0.0041	0.007	NA	0.045	0.095
52	0.30	0.41	0.110	0.244	0.0667	0.145	0.400	0.130	0.950	0.0041	0.007	NA	0.239	0.134
53	0.30	0.41	0.110	0.378	0.0667	0.175	0.490	0.115	1.005	0.0041	0.007	NA	0.144	0.117
54	0.30	0.41	0.128	0.255	0.0833	0.165	0.445	0.150	1.095	0.0041	0.007	NA	0.300	0.151
55	0.30	0.41	0.128	0.286	0.0833	0.195	0.440	0.145	1.135	0.0041	0.007	NA	0.280	0.147
56	0.30	0.41	0.128	0.390	0.0833	0.200	0.550	0.155	1.205	0.0041	0.007	NA	0.209	0.132
57	0.30	0.41	0.145	0.288	0.1000	0.185	0.485	0.180	1.210	0.0041	0.007	NA	0.343	0.163

ادامهٔ جدول (۳-۶)

Run	b (m)	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	XS (m)	h_d (m)	XD (m)	d_{50} (m)	d_{90} (m)	s (m) Eq.18	s (m) Eq. 3 ^a	s (m) Eq.32
58	0.30	0.41	0.145	0.380	0.1000	0.225	0.520	0.170	1.270	0.0041	0.007	NA	0.284	0.149
59	0.30	0.41	0.160	0.330	0.1167	0.230	0.535	0.195	1.325	0.0041	0.007	NA	0.378	0.172
60	0.30	0.41	0.160	0.365	0.1167	0.210	0.520	0.200	1.335	0.0041	0.007	NA	0.356	0.166
61	0.30	0.41	0.160	0.415	0.1167	0.223	0.620	0.195	1.325	0.0041	0.007	NA	0.324	0.158
62	0.30	0.41	0.174	0.349	0.1333	0.220	0.560	0.220	1.415	0.0041	0.007	NA	0.425	0.183
63	0.30	0.41	0.174	0.405	0.1333	0.235	0.630	0.210	1.460	0.0041	0.007	NA	0.391	0.174
64	0.30	0.41	0.188	0.395	0.1500	0.250	0.625	0.235	1.525	0.0041	0.007	NA	0.454	0.189
65	0.30	0.41	0.201	0.405	0.1667	0.265	0.620	0.235	1.570	0.0041	0.007	NA	0.502	0.199
66	0.30	0.41	0.201	0.420	0.1667	0.260	0.650	0.225	1.580	0.0041	0.007	NA	0.493	0.197
67	0.15	0.71	0.069	0.106	0.0333	0.060	0.305	0.030	0.515	0.0041	0.007	NA	0.173	0.110
68	0.15	0.71	0.069	0.298	0.0333	0.110	0.330	0.045	0.590	0.0041	0.007	NA	0.033	0.088
69	0.15	0.71	0.110	0.179	0.0667	0.115	0.390	0.070	0.780	0.0041	0.007	NA	0.279	0.148
70	0.15	0.71	0.110	0.317	0.0667	0.135	0.420	0.075	0.780	0.0041	0.007	NA	0.188	0.129
71	0.15	0.71	0.146	0.195	0.1000	0.140	0.410	0.115	0.950	0.0041	0.007	NA	0.396	0.184
72	0.15	0.71	0.146	0.334	0.1000	0.150	0.485	0.105	0.970	0.0041	0.007	NA	0.314	0.162
73	0.15	0.71	0.175	0.242	0.1333	0.185	0.490	0.130	1.145	0.0041	0.007	NA	0.484	0.208
74	0.15	0.71	0.175	0.350	0.1333	0.170	0.565	0.130	1.140	0.0041	0.007	NA	0.424	0.189
75	0.15	0.71	0.203	0.375	0.1667	0.220	0.595	0.145	1.190	0.0041	0.007	NA	0.519	0.212
76	0.15	0.71	0.071	0.086	0.0333	0.060	0.375	0.025	0.600	0.0041	0.007	NA	0.180	0.122
77	0.15	0.71	0.071	0.138	0.0333	0.065	0.370	0.030	0.600	0.0041	0.007	NA	0.149	0.114
78	0.15	0.71	0.071	0.192	0.0333	0.078	0.350	0.035	0.610	0.0041	0.007	NA	0.110	0.108
79	0.15	0.71	0.071	0.244	0.0333	0.085	0.375	0.035	0.630	0.0041	0.007	NA	0.070	0.103
80	0.15	0.71	0.071	0.330	0.0333	0.100	0.385	0.050	0.695	0.0041	0.007	NA	0.000	0.097
81	0.15	0.71	0.071	0.412	0.0333	0.114	0.390	0.045	0.680	0.0041	0.007	NA	NA	0.092
82	0.15	0.71	0.112	0.158	0.0667	0.085	0.455	0.070	0.885	0.0041	0.007	NA	0.284	0.164
83	0.15	0.71	0.112	0.350	0.0667	0.132	0.450	0.070	0.885	0.0041	0.007	NA	0.153	0.142
84	0.15	0.71	0.148	0.228	0.1000	0.150	0.515	0.110	1.110	0.0041	0.007	NA	0.310	0.160
85	0.15	0.71	0.148	0.365	0.1000	0.150	0.490	0.110	1.090	0.0041	0.007	NA	0.216	0.147
86	0.15	0.71	0.179	0.244	0.1333	0.195	0.580	0.155	1.315	0.0041	0.007	NA	0.401	0.187
87	0.15	0.71	0.179	0.385	0.1333	0.175	0.640	0.145	1.280	0.0041	0.007	NA	0.310	0.171
88	0.15	0.71	0.206	0.307	0.1667	0.225	0.670	0.165	1.420	0.0041	0.007	NA	0.457	0.203
89	0.30	0.41	0.043	0.136	0.0167	0.045	0.215	0.040	0.340	0.0115	0.0176	NA	0.037	0.057
90	0.30	0.41	0.043	0.331	0.0167	0.045	0.235	0.035	0.425	0.0115	0.0176	NA	NA	0.045
91	0.30	0.41	0.070	0.155	0.0333	0.060	0.265	0.055	0.495	0.0115	0.0176	NA	0.113	0.082
92	0.30	0.41	0.070	0.355	0.0333	0.085	0.325	0.050	0.565	0.0115	0.0176	NA	NA	0.066
93	0.30	0.41	0.091	0.169	0.0500	0.090	0.280	0.090	0.620	0.0115	0.0176	NA	0.176	0.102
94	0.30	0.41	0.091	0.365	0.0500	0.100	0.390	0.080	0.715	0.0115	0.0176	NA	0.029	0.083
95	0.30	0.41	0.110	0.208	0.0667	0.105	0.340	0.110	0.755	0.0115	0.0176	NA	0.216	0.115
96	0.30	0.41	0.110	0.351	0.0667	0.124	0.400	0.105	0.815	0.0115	0.0176	NA	0.113	0.100
97	0.30	0.41	0.128	0.221	0.0833	0.150	0.385	0.125	0.910	0.0115	0.0176	NA	0.268	0.129
98	0.30	0.41	0.128	0.360	0.0833	0.145	0.450	0.105	0.895	0.0115	0.0176	NA	0.172	0.113
99	0.30	0.41	0.145	0.232	0.1000	0.155	0.425	0.150	1.000	0.0115	0.0176	NA	0.317	0.142
100	0.30	0.41	0.145	0.353	0.1000	0.160	0.465	0.135	1.000	0.0115	0.0176	NA	0.237	0.127
101	0.30	0.41	0.160	0.276	0.1167	0.172	0.480	0.165	1.080	0.0115	0.0176	NA	0.343	0.150
102	0.30	0.41	0.160	0.360	0.1167	0.170	0.515	0.145	1.080	0.0115	0.0176	NA	0.289	0.139
103	0.30	0.41	0.170	0.309	0.1333	0.180	0.510	0.175	1.170	0.0115	0.0176	NA	0.374	0.157
104	0.30	0.41	0.170	0.380	0.1333	0.175	0.545	0.155	1.180	0.0115	0.0176	NA	0.329	0.147
105	0.30	0.41	0.185	0.319	0.1500	0.215	0.525	0.200	1.300	0.0115	0.0176	NA	0.418	0.167
106	0.30	0.41	0.185	0.390	0.1500	0.190	0.580	0.165	1.295	0.0115	0.0176	NA	0.374	0.157
107	0.30	0.41	0.196	0.335	0.1667	0.220	0.565	0.215	1.350	0.0115	0.0176	NA	0.456	0.175
108	0.30	0.41	0.196	0.375	0.1667	0.203	0.575	0.190	1.295	0.0115	0.0176	NA	0.432	0.169
109	0.15	0.41	0.069	0.104	0.0333	0.055	0.285	0.030	0.420	0.0115	0.0176	NA	0.147	0.098
110	0.15	0.41	0.069	0.301	0.0333	0.085	0.290	0.035	0.477	0.0115	0.0176	NA	NA	0.078
111	0.15	0.41	0.145	0.136	0.1000	0.094	0.385	0.080	0.725	0.0115	0.0176	NA	0.367	0.175
112	0.15	0.41	0.145	0.334	0.1000	0.110	0.490	0.085	0.795	0.0115	0.0176	NA	0.250	0.144
113	0.15	0.41	0.203	0.195	0.1667	0.165	0.475	0.150	1.020	0.0115	0.0176	NA	0.526	0.221
114	0.15	0.41	0.203	0.360	0.1667	0.135	0.565	0.105	1.050	0.0115	0.0176	NA	0.440	0.192

^aEq. 3 applied with $d_p = d_{50}$ diameters used in the model; NA=not applicable (negative values).

۳-۴-۳- عمق آبخستگی بیشینه: تحلیل مجموعه داده‌ها و معادلات پیش‌بینی

[8]

تجربیات آزمایشگاهی منتخب، بوسیلهٔ محدودهٔ وسیعی از متغیرهای مؤثر بر پدیدهٔ آبخستگی، مشخص می‌شوند. مطالعهٔ مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد که تفاوت مقیاسی بین تحقیق بورمن و ژولین (۱۹۹۱) که در فلومی با مقیاس بزرگ انجام شده است و آزمایشات ورونس (۱۹۳۷) و دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) و موسی (۱۹۹۸)، که به عنوان آزمایشات مقیاس متوسط یا کوچک فرض می‌شوند، وجود دارد. همچنین، آزمایشات در متغیرهای اندازه‌گیری شده با هم اختلاف دارند، زیرا برای آزمایش‌های دی‌آگوستینو (۱۹۹۴)، اندازه‌گیری‌های s, XS, h_D, XD موجود هستند، در صورتی که آزمایشات بورمن و ژولین (۱۹۹۱) و موسی (۱۹۹۸)، موقعیت XS و عمق آبخستگی s را فراهم می‌کنند.

فرق قابل توجه دیگر مجموعه داده‌ها، به توزیع دانه‌بندی بستر قبل از اجراء مربوط می‌شود. تحقیقات ورونس (۱۹۳۷) و موسی (۱۹۹۸)، روی اندازه‌ای یکنواخت ($d_{90}/d_{50} = 1$) متمرکز شده‌اند، در صورتی که در آزمایشات بورمن و ژولین (۱۹۹۱) و دی‌آگوستینو، نسبت d_{90}/d_{50} بین $1/5$ تا $5/3$ تغییر می‌کند. جدول (۳-۷)، نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه را در جفت گروه‌های ممکن، با در نظر گرفتن s/z به عنوان متغیر وابسته، نشان می‌دهد. عدد گزارش شده در ماتریس، ضریب همبستگی را طبق فرضیهٔ خطی بودن رابطهٔ تابعی بین لگاریتم‌های دو گروه، بیان می‌کند.

همچنین گروه بی‌بعد h_0/z ، شامل ضریب همبستگی ماتریس (جدول (۳-۷)) می‌شود، زیرا تحلیل رگرسیون چندگانه نشان می‌دهد که این نسبت، هنگامی که گروه مستقل منفرد استفاده شود، مؤثرترین گروه برای تخمین s/z می‌باشد.

کالیبراسیون آماری معادلهٔ (۳-۲۹)، بوسیلهٔ مجموعه داده‌های کلی انجام می‌شود و بوسیلهٔ تکنیک رگرسیون چندگانه روی لگاریتم‌های مبنای ده n دادهٔ موجود (۲۴۸)، جستجو می‌شود. مقادیر پارامترها، برای کمینه کردن تابع افت L ، به شرح زیر است:

$$L = \sum_{i=1}^n \left(\log_{10} \prod_{i, \text{observed}} - \log_{10} \prod_{i, \text{computed}} \right)^2 \quad (30-3)$$

جدول (۷-۳) ماتریس همبستگی آزمایشات ورونس (۱۹۳۷)، بورمن و ژولین (۱۹۹۱)، دی آگوستینو (۱۹۹۴) و موسی (۱۹۹۸)، (۲۴۸ داده) [8]

Group	b/z	h/H	h_0/z	A_{50}	A_{90}	d_{90}/d_{50}	b/B	s/z
b/z	1.000							
h/H	0.537	1.000						
h_0/z	0.891	0.669	1.000					
A_{50}	0.854	0.681	0.989	1.000				
A_{90}	0.864	0.679	0.992	0.999	1.000			
d_{90}/d_{50}	0.689	0.641	0.873	0.923	0.905	1.000		
b/B	0.705	0.113	0.447	0.422	0.436	0.266	1.000	
s/z	0.899	0.592	0.961	0.941	0.948	0.798	0.455	1.000

درجه دقت، بوسیله میانگین انحراف نسبی (MRD)^۱ گروه بی بعد وابسته اصلی، سنجیده می شود:

$$MRD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\Pi_{i,observed} - \Pi_{i,computed}|}{\Pi_{i,observed}} \quad (31-3)$$

رابطه (۳۱-۳)، نرخ کلی دقت رابطه را بوسیله ضریب همبستگی چندگانه R ، فراهم می کند.

بهترین عملکرد برای معادله (۲۹-۳)، بوسیله تحلیل قابل توجهی روی همه متغیرهای بی بعد با

استفاده از رگرسیون گام به گام پیشرو، بدست می آید:

$$\frac{s}{z} = 0.540 \left(\frac{b}{z}\right)^{0.593} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.751} \quad (32-3)$$

ضریب همبستگی چندگانه $R = 0.974$ می باشد و $MRD = 0.279$ و مقادیر تی استیودنت^۲ مربوط به همه گروه‌های بی بعد مستقل، بزرگتر از ۲ می باشند.

شکل (۱۲-۳)، مقادیر عمق آبخستگی نرمال شده اندازه گیری شده را در مقابل مقادیر محاسبه شده

بوسیله معادله (۳۲-۳)، نشان می دهد. با در نظر گرفتن وابستگی زیاد s/z به h_0/z ($R = 0.961$),

معادله پیش بینی ساده شده زیر نتیجه می شود (شکل (۱۳-۳)):

$$\frac{s}{z} = 0.975 \left(\frac{h_0}{z}\right)^{0.863} \quad (33-3)$$

این معادله دارای مقدار $R = 0.961$ و میانگین انحراف نسبی ($MRD = 0.334$) قابل قبول می باشد.

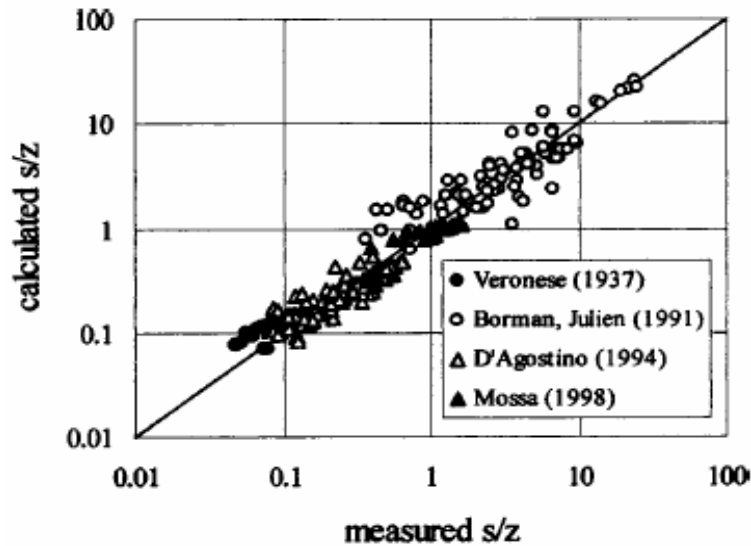
از مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده s/z و پیش بینی شده بوسیله معادله (۳۲-۳) (شکل (۱۲-۳)) و

معادله (۳۳-۳) (شکل (۱۳-۳))، بهترین عملکرد معادله (۳۲-۳)، برای آزمایشات مقیاس کوچک و

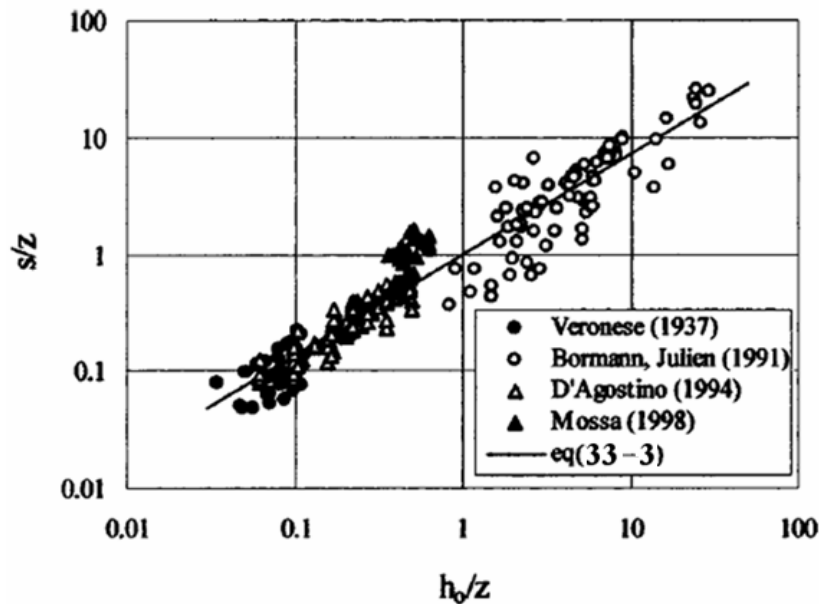
1 - Mean Relative Deviation (MRD)

2 - Student's t

مقیاس بزرگ، نتیجه می‌شود. از سوی دیگر، رابطه ساده شده (معادله ۳-۳۳)، برای داده‌های بزرگ مقیاس بورمن و ژولین و موسی به سمت دقت کم گرایش دارد.



شکل (۳-۱۲) مقایسه بین عمق آبشستگی نرمال شده اندازه‌گیری شده s/z و مقادیر محاسبه شده از معادله (۳-۳۲) [8]



شکل (۳-۱۳) مقایسه بین عمق آبشستگی نرمال شده اندازه‌گیری شده s/z و مقادیر محاسبه شده از معادله (۳-۳۳) [8]

۳-۴-۴- آزمایش معادلات پیشنهاد شده برای محاسبه عمق آبستگي بیشینه [8]

پیش‌بینی عمق آبستگي با استفاده از معادلات مبتنی بر تئوری خودتشابهی، باید تضمین کند که نتایج، به مقیاس تحت مطالعه حساس نیستند. به عبارتی دیگر، مقادیر عمق آبستگي اندازه‌گیری شده در مدل‌های آزمایشگاهی مقیاس کوچک یا در مدل اصلی بزرگ، دارای وزن یکسان برای کالیبره کردن یا آزمایش معادله پیش‌بینی، می‌باشند. از سوی دیگر، اثر مقیاس باقیمانده در معادله (۳-۳)، که توسط میسون و آروماگم (۱۹۸۵) استنتاج شده است، مشهود می‌باشد. از این رو استفاده از $d_s = d_m$ برای مدل، پیشنهاد می‌شود و یک قطر نماینده ثابت برای مدل اصلی، استفاده می‌شود.

برای آزمایش توانایی معادلات پیشنهاد شده، برای پیش‌بینی عمق آبستگي بیشینه (معادلات (۳-۳) و (۳۳-۳))، مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های میدانی (جدول (۳-۳))، در رودخانه میسیاگا^۱ (بلونو، ایتالیا) انجام شده است. داده‌های میسیاگا، به مسیری آبرفتی که شیب آن برابر ۰/۱۵ است، مربوط می‌شود. کاهش تراز رودخانه بوسیله ۱۳ سد کنترلی متوالی، کنترل می‌شود که سرریزهای لبه پهنی به عرض b متغیر در محدوده ۷/۵ تا ۱۰/۸ متر و ارتفاع ریزش z در محدوده ۰/۵۵ تا ۱/۳۵ متر دارند. رودخانه مستقیم است و سدهای کنترلی برای جریان، عمودی هستند. قلوه سنگ‌ها، بالادست و پايين دست هر سد کنترلی وجود ندارند و عبور جریان از سرریزها دست نخورده در نظر گرفته می‌شود. توزیع‌های دانه‌بندی بستر بین سدهای کنترلی متوالی نمونه‌برداری شد که محاسبه قطرهای نماینده ($d_{90} = 0.155m; d_{50} = 0.06m; d_{16} = 0.008m; d_m = 0.074m$) را اجازه می‌دهد. رودخانه میسیاگا بوسیله سیلی با دبی پیک $3/98 (m^3/s)$ تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این مقدار، با بکار بردن روش شیب مساحت برای مسیر مناسبی از رودخانه و فرض عمق بحرانی در سازه‌های کنترل شیب، تعیین می‌شود. بلافاصله بعد از سیل، اعماق آبستگي بیشینه، پايين دست هر سد کنترلی، بررسی می‌شوند. علی‌رغم توزیع منحصر بفرد دانه‌بندی بستر و محدوده باریک دبی‌های واحد و ارتفاع‌های ریزش، داده‌های مشاهده شده محدوده وسیعی از مقادیر s را نشان می‌دهند. این مدرک، این فرضیه را تأیید می‌کند که انتقال رسوب گرفتار شده در چاله، می‌تواند بطور موضعی عمق آبستگي را در مقایسه با آبستگي ایجاد شده بوسیله جریان آب زلال، کاهش دهد.

1 - Missiaga

2 - Belluno, Italy

جدول (۳-۸) داده‌های تجربی آبراهه میسیاگا ($b = B$) [8]

Run	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	d_{50} (m)	B (m)	s (m) Eq. 18	s (m) Eq. 3	s (m) Eq. 32
1	1.00	0.368	0.531	0.379	0.45	0.06	10.50	NA	0.455	0.609
2	0.82	0.368	0.511	0.379	0.65	0.06	10.50	NA	0.476	0.612
3	0.60	0.368	0.482	0.379	0.50	0.06	10.50	NA	0.507	0.617
4	1.30	0.460	0.669	0.531	0.55	0.06	7.50	NA	0.567	0.580
5	0.90	0.460	0.624	0.531	0.65	0.06	7.50	NA	0.617	0.586
6	0.60	0.460	0.578	0.531	0.65	0.06	7.50	NA	0.665	0.593
7	0.55	0.460	0.568	0.531	0.65	0.06	7.50	NA	0.675	0.594
8	1.00	0.372	0.536	0.386	0.35	0.06	10.30	NA	0.463	0.607
9	0.65	0.380	0.502	0.398	0.45	0.06	10.00	NA	0.520	0.612
10	1.20	0.405	0.594	0.437	0.35	0.06	9.10	NA	0.491	0.595
11	0.68	0.368	0.493	0.379	0.40	0.06	10.50	NA	0.495	0.615
12	1.35	0.365	0.559	0.375	0.25	0.06	10.60	NA	0.418	0.605
13	0.72	0.361	0.491	0.369	0.15	0.06	10.80	NA	0.478	0.616

³Eq. 3 applied with $d_s = 0.25$ m (prototype); NA=not applicable (negative values).

داده‌های آبشستگی بیشتر، توسط *Falciai & Giacomini, 1978* به نقل از مرجع (۸) برداشت شده است (جدول (۳-۹)). آنها ۲۹ سد کنترلی که در رودخانه‌های مختلف واقع‌اند، را بررسی کردند. مطابق نظر آنها، آبشستگی‌ها ناشی از سیل‌هایی با دوره بازگشت ده ساله هستند. مقادیر نرخ جریان، بوسیله محاسبه رواناب بارندگی، بدست آمده‌اند. توزیع دانه‌بندی بستر بوسیله تحلیل وزنی الک بدست آمد. لنزی و همکاران (*Lenzi et al, 2000*) به نقل از مرجع (۸)، تعدادی آزمایش با استفاده از تأسیسات آزمایشگاهی، با مقیاس خیلی کوچک، انجام دادند (جدول (۳-۱۰)). تکرارها بوسیله مدل کردن آبشستگی اندازه‌گیری شده، پایین دست آستانه‌های بستر متوالی که در فواصل مساوی قرار دارند، انجام شد. شیب کانال از ۷/۸٪ تا ۱۵٪ تغییر می‌کند و نسبت بین طول آبشستگی و فاصله بین آستانه‌های بستر متوالی در محدوده ۲/۵ تا ۷ می‌باشد. مطابق نظر لنزی و همکاران (۲۰۰۰)، مقداری کمتر از نسبت ۲/۵ ذکر شده در بالا، باعث تداخل آستانه پایین دست با الگوی گودآب بالادست می‌شود و اعماق آبشستگی بیشینه حاصل را کاهش می‌دهد. رسوبات بستر این مجموعه داده‌ها، دانسیته نسبی ρ_s / ρ برابر با ۲/۶۳ دارند. برای آزمایش تحلیل آبشستگی بیشینه مؤثر s پایین بستر تثبیت شده، نیمرخ پایین دست گودآب ورودی در نظر گرفته شده است.

جدول (۳-۹) داده‌هاي تجربي (Falciai and Giacomini 1978) [8]

Run	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	d_{50} (m)	B (m)	s (m) Eq.18	s (m) Eq. 3 ^a	s (m) Eq.32
1	6.0	1.493	2.320	3.1	1.3	0.051	18.7	NA	1.660	1.766
2	0.3	2.292	1.859	5.9	0.7	0.032	9.3	1.138	4.305	2.290
3	1.6	2.025	2.311	4.9	1.4	0.039	11.2	NA	3.246	1.813
4	2.5	1.525	1.999	3.2	0.8	0.029	12.5	NA	2.135	1.695
5	0.9	2.445	2.413	6.5	1.2	0.035	9.8	0.691	4.311	2.073
6	0.5	3.345	2.782	10.4	2	0.037	5.5	1.800	6.256	2.027
7	2.8	2.080	2.627	5.1	1.3	0.046	14.6	NA	3.021	2.032
8	5.5	2.080	2.986	5.1	1.7	0.032	16.1	NA	2.568	2.334
9	2.5	2.025	2.516	4.9	2	0.025	16.5	NA	2.996	2.524
10	1.8	1.679	2.031	3.7	0.5	0.034	3.3	NA	2.559	0.797
11	1.3	2.134	2.318	5.3	1.1	0.050	18.2	NA	3.552	2.384
12	2.8	2.053	2.599	5	1.5	0.048	11.8	NA	2.974	1.751
13	5.3	3.961	4.996	13.4	1.4	0.031	5.4	NA	5.606	1.947
14	2.3	1.258	1.684	2.4	0.4	0.071	8.0	NA	1.725	0.890
15	2.8	1.395	1.900	2.8	0.5	0.057	7.5	NA	1.868	0.969
16	1.0	1.361	1.532	2.7	0.9	0.053	8.0	NA	2.203	1.048
17	2.6	1.188	1.645	2.2	1.3	0.066	9.8	NA	1.561	0.977
18	2.5	1.395	1.860	2.8	1.4	0.042	8.0	NA	1.917	1.100
19	2.8	1.460	1.972	3	0.4	0.051	7.4	NA	1.975	1.027
20	5.0	2.420	3.315	6.4	1.9	0.053	9.0	NA	3.164	1.600
21	3.8	1.885	2.570	4.4	1.8	0.093	13.8	NA	2.503	1.498
22	3.8	1.293	1.894	2.5	1.3	0.100	12.5	NA	1.575	1.062
23	2.0	0.793	1.128	1.2	1.1	0.058	5.5	NA	1.010	0.546
24	6.2	2.369	3.395	6.2	1.3	0.064	17.5	NA	2.917	2.214
25	5.2	2.369	3.283	6.2	1.6	0.019	17.6	NA	3.054	3.087
26	4.8	2.240	3.090	5.7	2.5	0.073	25.0	NA	2.912	2.558
27	4.0	2.618	3.386	7.2	2	0.075	20.0	NA	3.669	2.494
28	2.8	2.947	3.483	8.6	2.4	0.078	18.5	NA	4.544	2.592
29	4.0	2.970	3.751	8.7	3.5	0.067	21.0	NA	4.261	2.899

^aEq. 3 applied with $d_s = 0.25$ m (prototype); NA=not applicable (negative values).

جدول (۳-۱۰) داده‌هاي تجربي لنزي و همکاران (۲۰۰۰) [8]

Run	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	d_{50} (m)	B (m)	s (m) Eq.18	s (m) Eq. 3 ^a	s (m) Eq.32
1	0.018	0.05	0.048	0.0185	0.032	0.0085	0.6	NA	0.119	0.035
2	0.024	0.05	0.055	0.0208	0.042	0.0085	0.6	NA	0.128	0.036
3	0.037	0.06	0.064	0.0238	0.045	0.0085	0.6	NA	0.139	0.038
4	0.049	0.06	0.073	0.0275	0.046	0.0085	0.6	NA	0.153	0.040
5	0.056	0.07	0.077	0.0292	0.050	0.0085	0.6	NA	0.158	0.041
6	0.019	0.03	0.030	0.0073	0.016	0.0085	0.6	NA	0.059	0.022
7	0.028	0.04	0.043	0.0125	0.036	0.0085	0.6	NA	0.087	0.028
8	0.040	0.05	0.053	0.0163	0.035	0.0085	0.6	NA	0.104	0.031
9	0.059	0.05	0.065	0.0208	0.047	0.0085	0.6	NA	0.123	0.034
10	0.069	0.06	0.072	0.0238	0.053	0.0085	0.6	NA	0.134	0.036
11	0.046	0.02	0.033	0.0067	0.025	0.0085	0.6	NA	0.052	0.020
12	0.061	0.03	0.044	0.0100	0.034	0.0085	0.6	NA	0.070	0.024
13	0.083	0.04	0.058	0.0150	0.050	0.0085	0.6	NA	0.093	0.029

^aEq. 3 applied with $d_s = d_{50}$ diameter used in the model; NA=not applicable (negative values).

همچنين، برخی داده‌هاي مقياس بزرگ ورونس (۱۹۳۷)، شيممي (Scimemi, 1939) به نقل از مرجع ۸) و ويتاكر و شليس (Whittaker & Schleiss, 1984) به نقل از مرجع ۸) متناظر با فرسايش پايين دست سدها، در مجموعه داده‌هاي آزمايشي (جدول (۳-۱۱)) شامل مي‌شوند.

ورونس (۱۹۳۷) مشاهدات ميداني روي سد (Rocchetta dam) در رودخانه (Noce River) در ایتالیا را گزارش مي‌کند. توزيع دانه‌بندی بستر تقريباً يک‌نواخت ($d_{50} = 100mm$) نقل شده است و $d_{90} = 1.5d_{50}$ انتخاب مي‌شود.

شيممي (۱۹۳۹) جزئیات مشاهده شده فرسايش، پايين دست سد (Conowingo dam) روي رودخانه (Susquehanna River) را توصيف مي‌کند. منطقه گودآب، بوسيله بلوک‌هاي گرانيتي سنگفرش مي‌شود و مدل هيدروليکي آزمايشگاهی (مقياس ۵۰-۱)، تطابق کامل بين آبستگي مدل شده و مشاهده شده برای قطر ميانگين ۰/۱۵ متر، نشان مي‌دهد. توزيع دانه‌بندی معادل برای نمونه اصلي، $d_{50} = 0.75m$ و $d_{90} = 1.5d_{50}$ تنظيم مي‌شود.

ويتاكر و شليس (۱۹۸۴)، مقايسه‌اي از فرمول‌هاي مختلف برای سد (Cabora-Bassa dam) (موزامبيک، آفريقا) انجام دادند. دبي‌ها از یک دريچه کشويی تراز ميانی اندازه‌گيري مي‌شوند و بنابر اين پارامتر h_0 از طريق رابطه تئوري معتبر برای سرريز لبه پهن در کانال مستطیلی، از قبل محاسبه شده است.

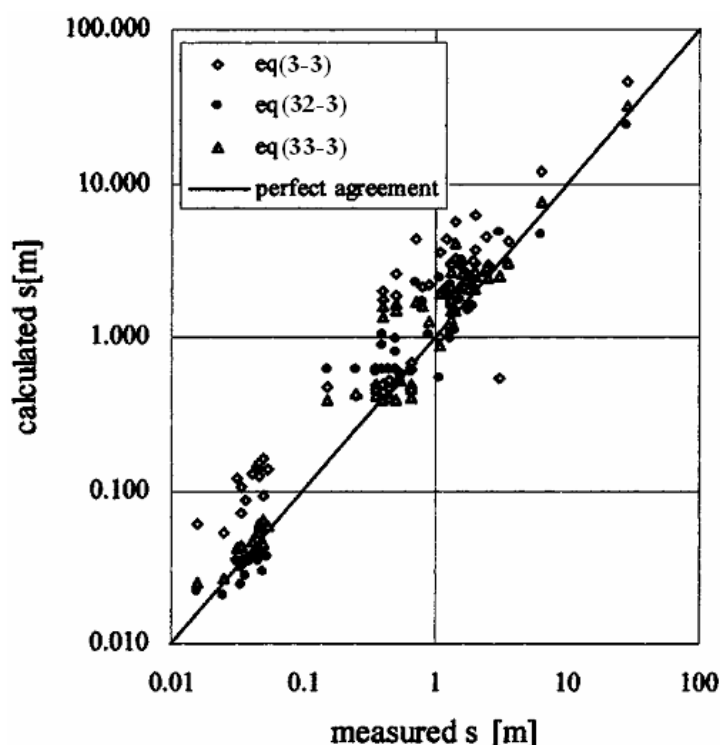
جدول (۳-۱۱) داده‌هاي تجربي ورونس (۱۹۳۷)، شيممي (۱۹۳۹)، ويتاكر و شيلدز (۱۹۸۴) [8]

Run	z (m)	h_0 (m)	h (m)	Q/B ($m^2 s^{-1}$)	s (m)	d_{50} (m)	B (m)	s (m) Eq. 18	s (m) Eq. 3 ^a	s (m) Eq. 32
1	12.9	2.00	5.0	4.571	3.0	0.1	25	NA	0.54	4.84
2	57.0	29.69	40	275	28	2.1	58	NA	45.42	23.56
3	19.2	6.85	7	38.97	6.2	0.75	11.6	NA	12.16	4.59

^aEq.3 applied with $d_s = 0.25$ m (prototype); NA=not applicable (negative values).

همه داده‌هاي جمع‌آوری شده (۵۸ تکرار، جدول‌هاي (۳-۸) تا (۳-۱۱))، برای ارزیابی عملکرد نسبي معادله پیشنهاد شده کامل (معادله (۳-۳۲)) و ساده شده (معادله (۳-۳۳)) پيش‌بینی آبستگي بیشینه، استفاده شده‌اند. بعلاوه، کارایی این معادلات، با معادله میسون و آروماگم (۱۹۸۵) (معادله (۳-۳)) که بطور متداول برای برآورد آبستگي بوسيله جت‌هاي ورودی پذیرفته شده است، مقايسه مي‌شود.

در شکل (۳-۱۴)، اعماق اندازه‌گيري شده در مقابل اعماق محاسبه شده آبستگي بيشينه s ، نشان داده شده است. مقادير رسم شده، نشان مي‌دهد که معادله (۳-۳) بطور كلي عمق آبستگي را بيش از اندازه، پيش‌بيني مي‌کند و احتياطي فرض مي‌شود. اختلاف کم بين مقادير محاسبه شده و اندازه‌گيري شده براي معادلات (۳-۳۲) و (۳-۳۳)، با بهترين عملکرد براي فرمول کامل، همراه است. عملکرد معادله (۳-۱۸) در شکل (۳-۱۴) معرفي نشده است، زيرا اين معادله آخر براي مجموعه داده‌هاي آزمايشي استفاده شده، قابل کاربرد نيست. در حقيقت جدول‌هاي (۳-۸) تا (۳-۱۱)، نشان مي‌دهند که، فقط براي سه مورد، معادله (۳-۱۸)، مقادير مثبت عمق آبستگي بيشينه را نتيجه مي‌دهد.



شکل (۳-۱۴) مقايسه بين مجموعه داده‌هاي جدول (۳-۸) تا (۳-۱۱) بين مقادير اندازه‌گيري شده و محاسبه شده از فرمول‌هاي (۳-۳)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) [8]

با استفاده از ميانگين انحراف نسبي (MRD) (معادله (۳-۳۱)) محاسبه شده براي متغير عمق آبستگي s به عنوان پارامتر مقايسه، اين الگوي كلي هنوز بديهي است: $MRD = 0.476$ براي معادله (۳-۳۲)، $MRD = 0.496$ براي معادله (۳-۳۳) و $MRD = 1.276$ براي معادله (۳-۳). اختلاف کم مقادير MRD بين معادله ساده شده (۳-۳۳) و معادله کامل (۳-۳۲)، استفاده از فرمول سريع، زماني که اطلاعات خواسته شده در دسترس نباشند و يا براي بدست آوردن مقادير اوليه، را تايد مي‌کند.

۳-۴-۵- موقعیت آبشستگی بیشینه [8]

کاهش تراز موضعی بستر که بوسیله جت ورودی ایجاد می‌شود، نقطه‌ای را که جت به بستر اصابت می‌کند، نسبت به شرایط پایینی ثابت، تغییر می‌دهد. همچنین، این موقعیت برای تعریف شیب وجه بالادست نیمرخ چاله، با اهمیت می‌شود. با استفاده از مجموعه داده‌های بورمن و ژولین (۱۹۹۱)، دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) و موسی (۱۹۹۸)، تحلیل آماری انجام شده بوسیله روش‌های رگرسیونی گام‌به‌گام پیشرو (لگاریتم داده‌ها)، منجر به رابطه پیش‌بینی زیر می‌شود:

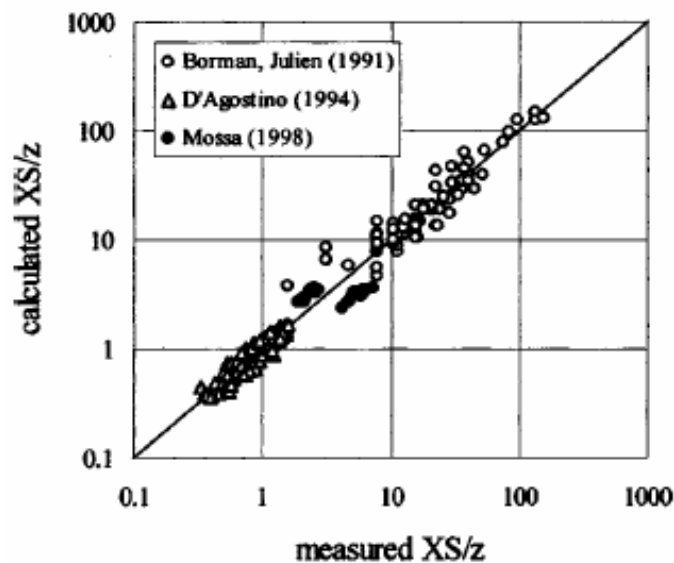
$$\frac{XS}{z} = 1.616 \left(\frac{b}{z}\right)^{0.662} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.117} A_{90}^{0.455} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.478} \quad (34-3)$$

معادله بالا دارای درجه دقت خیلی زیاد ($R = 0.987, MRD = 0.196$) می‌باشد.

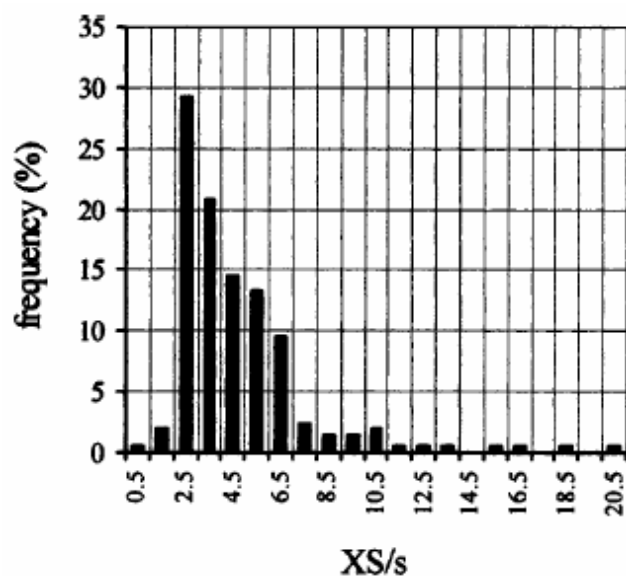
معادله (۳-۳۴) نشان می‌دهد که تأثیر d_{90} در تغییر طول XS ، بیشتر از تأثیر آن روی عمق آبشستگی بیشینه می‌باشد. علاوه بر این، انحراف مورد انتظار MRD در محاسبات طول نرمال شده XS/z ، کمتر از ارزیابی s/z متناظر است. این یافته تا حدی از داده‌های مشاهده شده، نتیجه می‌شود، زیرا خطای اندازه‌گیری سیستماتیک داده شده طول‌ها (s, XS)، درصد اثر بیشتری روی s نسبت به XS دارد. کارایی معادله (۳-۳۴)، در محدوده داده‌های مقیاس کوچک تا داده‌های مقیاس بزرگ (شکل (۳-۱۵))، یکنواخت است.

همچنین، برای مجموعه داده‌های دردسترس، توزیع فراوانی پارامتر XS/s ، تحلیل شده است (۲۱۲ داده). مقادیر XS/s از ۰/۹ تا ۲۱/۸ تغییر می‌کنند و مقدار میانگین ۴/۶ و انحراف معیار ۲/۸ دارند.

بعد از رتبه‌بندی داده‌ها در کلاس‌های عرض واحد، تحلیل توزیع فراوانی (شکل (۳-۱۶))، مد^۱ $XS/s = 2-3$ را نشان می‌دهد (تقریباً ۳۰٪ داده‌ها) و ۷۸٪ مقادیر، در محدوده $XS/s = 2-6$ قرار می‌گیرند. دم نهایی بلند توزیع فراوانی (چولگی مثبت)، (۳/۸٪) نسبت XS/s بیش از ۱۰ را به عنوان نسبت خیلی کم، دسته‌بندی می‌کند.



شکل (۳-۱۵) مقایسه مقادیر گروه‌های بی بعد اندازه‌گیری شده XS/z و مقادیر محاسبه شده از معادله (۳-۳۴) [8]



شکل (۳-۱۶) توزیع فراوانی پارامتر XS/s برای آزمایشات بورمن و ژولین (۱۹۹۱)، دی‌آگوستینو (۱۹۹۴)، موسی (۱۹۹۸) [8]

۳-۴-۶- پشته ته‌نشین شده^۱ [8]

موقعیت و ارتفاع تلماسه، پایین دست گوداب، پارامترهای بسیار مفیدی برای طراحی سازه عرضی فرعی^۲ می‌باشند، که قادراند نیمرخ آبخستگی حالت دائمی را هنگام سیل، القاء کنند. داده‌های

1 - Deposited mound

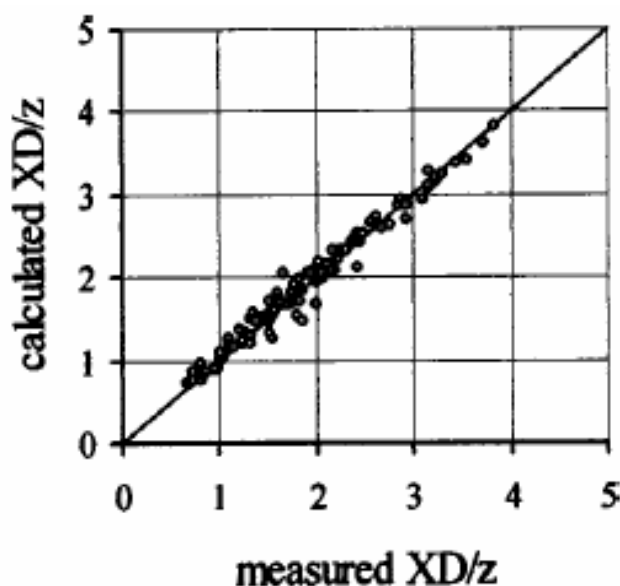
2 - Subsidiary transversal structure

دی آگوستینو (جدول (۳-۶))، برای کالیبره کردن معادلات پیش‌بینی طول XD و ارتفاع تلماسه h_D ، تحلیل شده‌اند. تحلیل، با استفاده از تقریب ISS انجام شده است، که تغییرناپذیری مقیاسی قویتری نسبت به روابطی که قبلاً توسط دی آگوستینو (۱۹۹۴) استنتاج شده بود را، تضمین می‌کند. کالیبراسیون رابطه‌ای نظیر معادله (۳-۲۹) در حالت $\Pi_1 = XD/z$ یا $\Pi_1 = h_D/z$ ، که گروه‌های بی‌بعد کم اهمیت‌تر حذف شده‌اند (تحلیل آماری پیشرو گام‌به‌گام)، روابط زیر را تولید می‌کند:

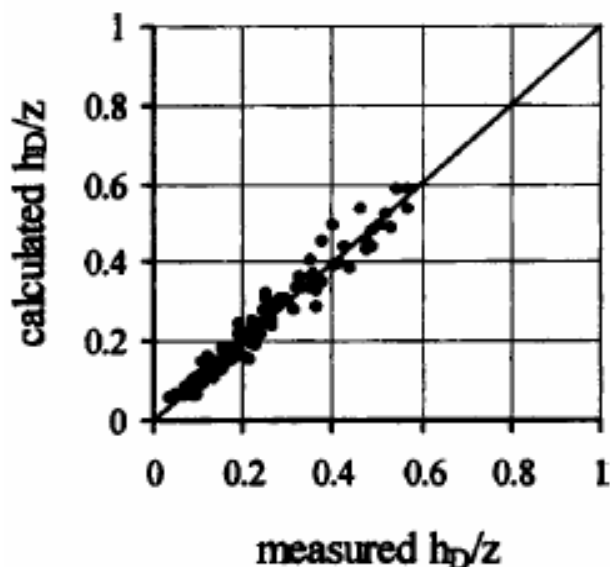
$$\frac{XD}{z} = 5.828 \left(\frac{b}{z}\right)^{0.241} \left(\frac{h}{H}\right)^{0.041} (A_{50})^{0.508} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-1.077} \left(\frac{b}{B}\right)^{0.057} \quad (3-35)$$

$$\frac{h_D}{z} = 2.780 \left(\frac{h}{H}\right)^{0.061} (A_{90})^{0.764} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-2.489} \left(\frac{b}{B}\right)^{0.794} \quad (3-36)$$

ضرائب همبستگی و میانگین انحراف نسبی $R = 0.987$ و $MRD = 0.049$ برای معادله (۳-۳۵) و $R = 0.976$ و $MRD = 0.110$ برای معادله (۳-۳۶) می‌باشند. شکل‌های (۳-۱۷) و (۳-۱۸)، الگوی مقادیر اندازه‌گیری شده را در برابر مقادیر محاسبه شده برای XD/z و h_D/z نشان می‌دهند.



شکل (۳-۱۷) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از معادله (۳-۳۵) برای گروه بی‌بعد XD/z [8]



شکل (۳-۱۸) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از معادله (۳-۳۶) برای گروه بی‌بعد h_D/z [8]

مشابه پارامترهای الگوی آبستگي، پارامتر طول XD/z ، با دقت بالا نسبت به نرخ اغتشاش عمودی

h_D/z تخمین زده می‌شود.

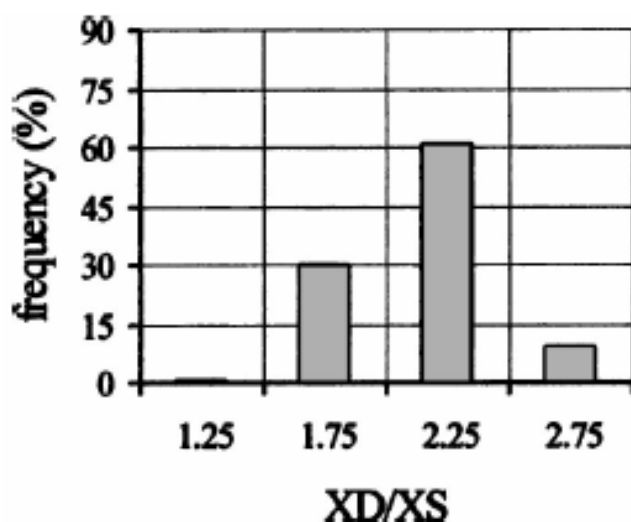
نهایتاً، با در نظر گرفتن نسبت XD/XS برای همان داده‌ها و دسته‌بندی کردن این نسبت به

کلاس‌هایی با عرض ۰/۵، توزیع فراوانی رسم شده در شکل (۳-۱۹) بدست می‌آید. کل نیمرخ آبستگي،

بطور متوسط گرایش به تقارن دارد (مقدار میانگین نسبت XD/XS برابر ۲/۱۵) با شیبی ملایمتر در

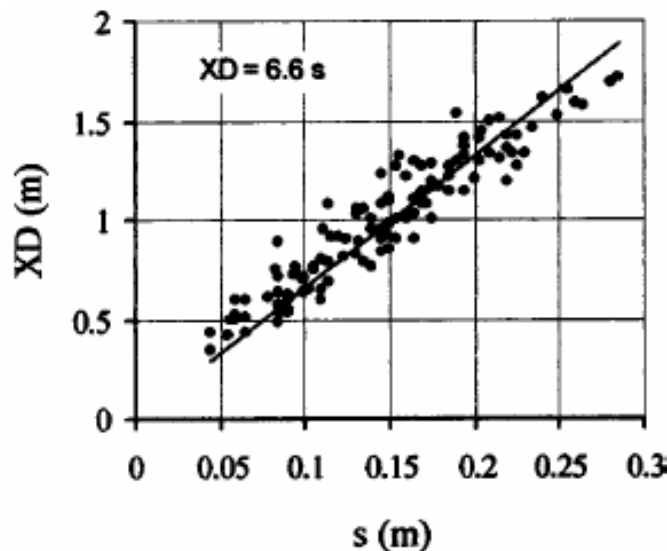
وجه پايين دست و به طور کلی h_D/z کمتر از s/z می‌باشد (مقدار میانگین h_D/s برابر با ۰/۷۹). بیشتر

داده‌ها (۶۰/۵٪) در محدوده $2 < XD/XS \leq 2.5$ می‌باشند.



شکل (۳-۱۹) توزیع فراوانی پارامتر XD/XS برای داده‌های دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) [8]

همچنین، شکل متقارن حاکم چاله آبشستگی، بوسیله رابطه سازگار بین عمق آبشستگی بیشینه و طول افقی تاج تلماسه اثبات می‌شود (شکل (۳-۲۰)).



شکل (۳-۲۰) بیشترین طول تلماسه XD در مقابل بیشترین عمق آبشستگی برای داده‌های دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) [8]

۳-۴-۷- نتایج حاصل از تحقیق دی‌آگوستینو و فرو

مدل کردن فیزیکی پدیده آبشستگی موضعی بوسیله تعدادی عدم قطعیت‌ها تحت تأثیر قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با استفاده از مدل کاهش مقیاس داده شده، باید با احتیاط برای پیش‌بینی‌های مقیاس‌های بزرگتر بکار رود.

کاربرد تئوری خودتشابهی ناقص برای ارزیابی الگوی آبشستگی، پایین دست سازه کنترل شیب، پیشرفت مناسبی برای کاهش اثرات مقیاس‌گذاری ارائه می‌کند. تحلیل و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده در مقیاس‌های مختلف و مشخص شده بوسیله توزیع‌های مختلف دانه‌بندی بستر، رابطه‌ای برای پیش‌بینی اعماق آبشستگی ماکزیمم تولید می‌کند (معادله (۳-۳۲)).

عمق آبشستگی نرمال شده s/z برای ارتباط بیشتر به گروه h_0/z ، برای مجموعه داده‌های یکنواخت و هم غیریکنواخت، ظاهر می‌شود. این پارامتر منحصر بفرد برای تخمین اولیه s/z در نظر گرفته می‌شود (معادله (۳-۳۳)).

توانمندی معادلات پیشنهاد شده برای تخمین عمق آبشستگی بیشینه (معادلات (۳-۳۲) و (۳-۳۳)) با استفاده از مجموعه داده‌های مستقل شامل مدل‌های آزمایشگاهی مقیاس کوچک و نمونه اصلی بزرگ، آزمایش شده‌اند. این مجموعه داده‌ها شامل اندازه‌گیری‌های جدید انجام شده در رودخانه‌ای در ایتالیا و

داده‌هاي عمق آبستگي اضافي موجود در متون، مي‌شود. همه داده‌هاي گردآوري شده (۵۸ آزمايش) براي ارزيابي عملکرد معادلات پيشنهاد شده (معادلات (۳-۳) و (۳-۳)) و معادله پذيرفته شده متداول (معادله (۳-۳) ميسون و آروماگم (۱۹۸۵))، استفاده شده‌اند. مقايسه بين مقادير اندازه‌گيري شده و محاسبه شده عمق آبستگي، نشان مي‌دهد که بهترين تخمين با استفاده از معادله (۳-۳)، بدست مي‌آيد، در صورتي که که معادله (۳-۳) (ميسون و آروماگم (۱۹۸۵))، به برآورد بالا گرايش دارد.

همچنين، تحليل نشان مي‌دهد که اگر توزيع دانه‌بندی بستر غيریکنواخت اتفاق بيافتد، گروه‌هاي توصيف کننده تغيير شکل طولی XS/z ، بوسيله مواد درشت بستر تحت تأثير قرار مي‌گيرند. اين نتيجه بوسيله حضور گروه A_{90} در معادله (۳-۳) ثابت مي‌شود.

بعلاوه، آشفته‌گي‌هاي عمودي ايجاد شده بوسيله جت، (s/z و h_D/z) بطور واضح با دقت کمتری نسبت به تغيير شکل‌هاي طولی (XS/z , XD/z) پيش‌بيني مي‌شوند. مخصوصاً معادله (۳-۳)، که بر مبنای تعداد وسيعی از اندازه‌گيري‌هاي XS/z می‌باشد، نتيجه بورمن و ژولين (۱۹۹۴) که پيشنهاد کردند که طول پخشیدگی جت می‌تواند با دقت قابل قبولی تعيين شود را تأييد می‌کند.

همچنين، دسته‌بندی نسبت XS/s نشان مي‌دهد که بيشتر مقادير (۰.۸۰)، کمتر از ۶ هستند. الگوی متقارن نيمرخ آبستگي، بخوبي بوسيله توزيع فراواني نسبت XD/XS که دارای مد خیلی نزديک به ۲ می‌باشد و رابطه مستقيم بين s و XD ، توصيف می‌شود. اين آخرين یافته‌ها، بررسی‌هاي ميدانی روی آشفته‌گي‌هاي طبیعی بستر رودخانه (طول موج واحدهاي مورفولوژیکی آبرفتی نظير گوداب‌هاي پله‌ای یا گوداب‌هاي پله‌ای خيزآبی) برای محاسبه آبستگي مورد انتظار، پايين دست سازه‌هاي کنترل شيب را تقويت می‌کنند.

فصل چهارم

شبکه‌های عصبی مصنوعی

۴-۱- مقدمه

در سالیان اخیر، شاهد حرکت مستمری از تحقیقات صرفاً نظری به تحقیقات کاربردی بخصوص در زمینه پردازش اطلاعات، برای مسائلی که برای آنها راه‌حلی موجود نیست و یا براحتی قابل حل نیستند هستیم. تأثیر پارامترهای بسیار زیاد در برخی فرآیندهای فیزیکی و وجود روابط کاملاً غیرخطی میان آنها، بر پیچیدگی کار می‌افزاید. از جمله این مسائل روش‌هایی است که برای تخمین آبشستگی به کار می‌روند. با عنایت به این امر، علاقه فزاینده‌ای در توسعه تئوریک سیستم‌های دینامیکی هوشمند مدل آزاد^۱ که مبتنی بر داده‌های تجربی هستند، ایجاد شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANNs)، جزء این دسته از سیستم‌های دینامیکی قرار دارند، که با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش نهفته یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار منتقل می‌کنند. به همین خاطر به آنها سیستم‌های هوشمند^۳ می‌گویند، زیرا بر اساس محاسبات بر داده‌های عددی یا مثال‌ها، قوانین کلی را فرا می‌گیرند.

در استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، سعی می‌شود، با آموزش شبکه‌ای پردازشگر، بدون یافتن قانون ریاضی حاکم بر پارامترها، ویژگی‌ها و روابط ذاتی میان متغیرها به شبکه آموزش داده شود و پس از تضمین یادگیری، از آن در تعمیم‌دهی و ایجاد رابطه غیرخطی بین دو فضای ورودی و خروجی استفاده گردد. در واقع سرعت بسیار بالای انجام عملیات منطقی توسط کامپیوتر و ساختار پردازش موازی شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان دو مکمل هم، باعث شده شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان ابزاری مناسب برای بسیاری از مسائل استفاده شوند.

پیاده‌سازی ویژگی‌های شگفت‌انگیز مغز در یک سیستم مصنوعی (سیستم‌های دینامیکی ساخته بشر)، همیشه وسوسه‌انگیز و مطلوب بوده است. محققینی که سال‌ها در این زمینه فعالیت کرده‌اند بسیاریند، لیکن نتیجه این تلاش‌ها، صرف نظر از یافته‌های ارزشمند، باور هر چه بیشتر این اصل بوده است که مغز بشر دست نیافتنی است.

1 - Free model

2 - Artificial Neural Networks (ANNs)

3 - Intelligent systems

۴-۲- تاریخچه شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۱]

بعضی از پیش‌زمینه‌های شبکه‌های عصبی را می‌توان به اوایل قرن بیستم و اواخر قرن نوزدهم برگرداند. در این دوره، کارهای اساسی در فیزیک، روانشناسی و نروفیزیولوژی^۱ توسط دانشمندانی چون هرمان فون هلمهلتز^۲، ارنست ماخ^۳ و ایوان پاولف^۴ صورت پذیرفت. این کارهای اولیه، عموماً بر تئوری‌های کلی یادگیری، بینایی و شرطی تأکید داشته‌اند و اصلاً به مدل‌های مشخص ریاضی عملکرد نرون‌ها^۵ اشاره‌ای نداشته‌اند.

دیدگاه جدید شبکه‌های عصبی در دههٔ چهل قرن بیستم آغاز شد، زمانی که وارن مک کولچ^۶ و والتر پیترز^۷ نشان دادند که شبکه‌های عصبی، می‌توانند هر تابع حسابی و منطقی^۸ را محاسبه نمایند. کار این افراد را می‌توان نقطهٔ شروع حوزهٔ علمی شبکه‌های عصبی مصنوعی نامید. این موضوع با دونالد هب^۹ ادامه یافت. شخصی که عمل شرط‌گذاری^{۱۰} کلاسیک را که توسط پاولف مطرح شده بود، به عنوان خواص نرون‌ها معرفی نمود و سپس مکانیسمی را جهت یادگیری نرون‌های بیولوژیکی ارائه داد.

نخستین کاربرد عملی شبکه‌های عصبی در اواخر دههٔ پنجاه قرن بیستم مطرح شد، زمانی که فرانک روزنبلات^{۱۱} در سال ۱۹۵۸ شبکهٔ پرسپترون^{۱۲} را معرفی نمود. روزنبلات و همکارانش، شبکه‌ای ساختند که قادر بود الگوها را از هم شناسایی نماید. در همین زمان بود که برنارد ویدرو^{۱۳} در سال ۱۹۶۰ شبکهٔ عصبی تطبیقی خطی آدالین^{۱۴} را با قانون یادگیری جدید مطرح نمود که از لحاظ ساختار، شبیه شبکهٔ پرسپترون بود.

هر دو شبکه، پرسپترون و آدالین، دارای این محدودیت بودند که توانایی طبقه‌بندی الگوهای را داشتند، که بطور خطی از هم متمایز می‌شدند. ویدرو و روزنبلات هر دو از این امر آگاه بودند، چون آنها قانون یادگیری را برای شبکه‌های عصبی تک‌لایه مطرح نموده بودند که توانایی محدودی جهت تخمین

-
- 1 - Neuro-Physiology
 - 2 - Hermann Von Helmholtz
 - 3 - Ernst Mach
 - 4 - Ivan Pavlov
 - 5 - Neurons
 - 6 - Warren McCulloch
 - 7 - Walter Pitts
 - 8 - Arithmetic & logical function
 - 9 - Donald Hebb
 - 10 - Conditioning
 - 11 - Frank Rosenblatt
 - 12 - Perceptron
 - 13 - Bernurd Widrow
 - 14 - Adaline (Adaptive linear element)

توابع داشتند. هر چند آنها توانستند شبکه‌های چند لایه را مطرح نمایند، لیکن نتوانستند الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های عصبی تک‌لایه را بهبود بخشند.

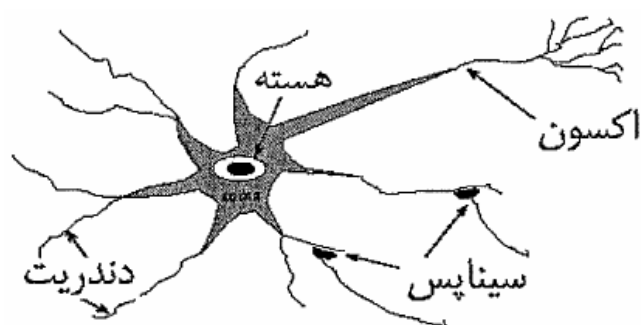
پیشرفت شبکه‌های عصبی تا دهه هفتاد قرن بیستم ادامه یافت. در سال ۱۹۷۲ ^۱تئوکوهونن^۱ و جیمز اندرسون^۲ بطور مستقل و بدون اطلاع از هم، شبکه‌های عصبی جدیدی را معرفی نمودند که قادر بودند، به عنوان عناصر ذخیره‌ساز عمل نمایند. استفان گروسبرگ^۳ در این دهه، روی شبکه‌های خودسازمانده^۴ فعالیت می‌کرد. فعالیت در زمینه شبکه‌های عصبی در دهه شصت قرن بیستم در قیاس با دهه هشتاد به علت عدم بروز ایده‌های جدید و نبود کامپیوترهای سریع جهت پیاده‌سازی، کم‌رنگ می‌نمود. لیکن در خلال دهه هشتاد، رشد تکنولوژی میکروپروسورها روند صعودی داشت و تحقیقات روی شبکه‌های عصبی فزونی یافت و ایده‌های بسیار جدیدی مطرح شدند. ایده‌های نو و تکنولوژی بالا برای رنسانس دوباره در شبکه‌های عصبی کافی به نظر می‌رسید. در این زایش دوباره شبکه‌های عصبی، دو نگرش جدید قابل تأمل می‌باشد. استفاده از مکانیسم تصادفی جهت توضیح عملکرد یک طبقه وسیع از شبکه‌های برگشتی^۵ که می‌توان آنها را جهت ذخیره‌سازی اطلاعات استفاده نمود. این ایده توسط جان هاپفیلد^۶، فیزیکدان آمریکایی، در سال ۱۹۸۲ مطرح شد. دومین ایده مهم که کلید توسعه شبکه‌های عصبی در دهه هشتاد شد، الگوریتم پس‌انتشار خطا^۷ می‌باشد که توسط دیوید راملهارت^۸ و جیمز مک‌کلند^۹ در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. با بروز این دو ایده، شبکه‌های عصبی متحول شدند. در بیست سال اخیر هزاران مقاله نوشته شده است و شبکه‌های عصبی کاربردهای زیادی در رشته‌های مختلف علوم پیدا کرده‌اند. شبکه‌های عصبی در هر دو جهت توسعه تئوریک و عملی، در حال رشد می‌باشند. اما این روند رشد، آهسته و مطمئن نبوده، دوره‌هایی بسیار سریع و دوره‌هایی کند مشاهده شده است. بیشتر پیشرفت‌ها در شبکه‌های عصبی به ساختارهای نوین و روش‌های یادگیری جدید مربوط می‌شود.

باید توجه داشت که در حال حاضر، اطلاعات موجود درباره نحوه عملکرد مغز بسیار محدود است و مهمترین پیشرفت‌ها در شبکه‌های عصبی، در آینده مطرح خواهند شد، زمانی که اطلاعات بیشتری از چگونگی عملکرد مغز و نرون‌های بیولوژیک در دست باشد.

-
- 1 - Teo Kohonen
 - 2 - James Anderson
 - 3 - Stefan Grossberg
 - 4 - Self organizing
 - 5 - Feedback (Recurrent)
 - 6 - John Hopfield
 - 7 - Error back propagation
 - 8 - David Rummelhart
 - 9 - James Mccland

۴-۳- شبکه‌های عصبی زیستی

مغز به عنوان یک سیستم پردازش اطلاعات موازی، از حدود 10^{11} نرون^۱ به هم مرتبط با 10^{16} ارتباط نرونی تشکیل شده است [۱۱]. نرون‌ها ساده‌ترین واحد ساختاری سیستم‌های عصبی هستند. بافت‌هایی که عصب نامیده می‌شوند، اجتماعی از نرون‌ها هستند که پیامها را از یک قسمت بدن به قسمت دیگر منتقل می‌کنند. بدنه نرون که وظیفه جمع‌آوری ورودی‌ها را دارد سوما^۲ نامیده می‌شود. شکل (۴-۱)، ساختمان یک نرون را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل (۴-۱) ساختمان یک نرون [۱۲]

به سوما رشته‌های طولانی و نامنظم متصل است که به آنها دندریت^۳ گفته می‌شود. قطر آنها اغلب از یک میکرون نازکتر است و اشکال شاخه‌ای دارند که هر شاخه به شاخه‌های نازکتری تقسیم می‌شود. دندریت‌ها، سیگنال‌های الکتریکی را به هسته سلول منتقل می‌کنند. بدنه سلول، انرژی لازم را برای فعالیت نرون فراهم نموده و بر روی سیگنال‌های دریافتی، یکسری اعمال انجام می‌دهد [۱۲].

آنچه که در نرون وظیفه خروجی را انجام می‌دهد، اکسون^۴ نام دارد. اکسون بر خلاف دندریت‌ها، از سطحی هموارتر و تعداد شاخه‌های کمتری برخوردار است. اکسون طول بیشتری دارد و سیگنال الکتروشیمیایی دریافتی از هسته سلول را به نرون‌های دیگر منتقل می‌کند. محل تلاقی یک اکسون، از یک سلول به دندریت سلول دیگر را سیناپس^۵ گویند. سیناپس‌ها واحدهای ساختاری کوچک تابعی^۶ هستند که ارتباط بین نرون‌ها را برقرار می‌سازند. چگونگی برقراری ارتباط بین سلول عصبی، به مقدار

- 1 - Neuron
- 2 - Soma
- 3 - Dendrite
- 4 - Axon
- 5 - Synapse
- 6 - Functional

مواد انتقال دهنده نرونی که در انتهای اکسون‌ها ذخیره شده‌اند، بستگی دارد. وقتی که یک پتانسیل تحریک، به انتهای یک اکسون می‌رسد، موجب آزاد شدن یک ماده شیمیایی بنام انتقال دهنده نرونی^۱ می‌شود که پس از نفوذ در سیناپس‌ها، گیرنده‌های سلول مجاور را فعال می‌کند. فرآیند یادگیری از طریق تنظیم شدت و ضعف سیناپس‌ها صورت می‌گیرد که توسط یک فرآیند شیمیایی خیلی پیچیده انجام می‌شود. دو قسمت اخیر، عناصر ارتباطی نرون هستند [۱۱].

نرون‌ها بر اساس ساختارهایی که بین آنها پیامها هدایت می‌شوند، به سه دسته تقسیم می‌گردند:

- ۱ - **نرون‌های حسی** که اطلاعات را از ارگان‌های حسی به مغز و نخاع می‌فرستند.
 - ۲ - **نرون‌های محرک** که سیگنال‌های فرمان را از مغز و نخاع به ماهیچه‌ها و غدد هدایت می‌کنند.
 - ۳ - **نرون‌های ارتباطی** که نرون‌ها را به هم متصل می‌کنند. این نرون‌ها پیامها را از نرون‌های حسی می‌گیرند و به یک نرون ارتباطی دیگر انتقال می‌دهند و یا پیامها را به یک نرون محرک می‌رسانند.
- در شبکه‌های عصبی مصنوعی، نرون‌های حسی را لایه ورودی، نرون‌های محرک را نرون‌های لایه خارجی و نرون‌های ارتباطی را لایه پنهان یا لایه مخفی نیز می‌گویند [۱۱].

۴-۴ - شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۱]

حدود پنجاه سال است که تحقیقات گسترده‌ای برای شبیه‌سازی عملکرد رایانه‌ها از طریق مدل‌سازی مغز انسان توسط محققین مختلف چه در نظریه و چه در عمل در حال انجام است و ماحصل تحقیقات آنها، مجموعه‌ای را تشکیل می‌دهد که به آن هوش مصنوعی می‌گویند.

فلسفه اصلی محاسبات شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل کردن عمده ویژگی‌های مغز و نحوه عملکرد آن در جهت ساخت کامپیوترهایی است که اکثر ویژگی‌های مفید مغز را از خود نشان دهند. کاربردهای روز افزون شبکه‌های عصبی مصنوعی در مسائل مختلف امکان دستیابی به حافظه گسترده و نیز جایگزینی مکانیزم یادگیری به جای الگوریتم برنامه‌ریزی، موجب شده تا دامنه تحقیقات در این خصوص روزبه‌روز گسترده‌تر شود.

با اینکه شبکه‌های عصبی مصنوعی حقیقتاً با شبکه‌های عصبی زیستی فاصله زیادی دارند، اما دارای برخی ویژگی‌های مشترک و ممتاز زیر می‌باشند:

- ۱ - بلوک‌های ساختاری پردازشگرهای آن دارای شکل ساده نظیر نرون‌های زیستی می‌باشند.

۲ - ساختار پردازشی آنها، به صورت موازی است که نتیجه آن قدرت پردازش بیشتر با سرعت بسیار بالا می‌باشد.

۳ - قابلیت یادگیری از طریق ارائه مثال را دارند. این کار از طریق ذخیره اطلاعات درون وزن‌های سیناپسی صورت می‌گیرد و می‌توانند در طی زمان و در برخورد با شرایط جدید، پارامترهای درونی خود را سازگار کنند.

۴ - توانایی تعمیم‌دهی دارند، به نحوی که پس از محقق شدن یادگیری، با اعمال ورودی‌هایی که به آنها آموزش ندیده‌اند، شبکه خروجی مناسب را ارائه می‌کنند.

۵ - شبکه طراحی شده در برابر نویز که در اکثر داده‌های واقعی موجود است، مقاوم می‌باشند.

۶ - در صورت بروز اختلال در بخشی از اتصالات شبکه، بدلیل ذخیره توزیعی اطلاعات در وزن‌های شبکه (حافظه گسترده)، اختلال قابل توجهی در عملکرد شبکه بروز نمی‌کند.

۴-۴-۱- کاربردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۱]

اگر چه هنوز مدت زیادی از تولد روش‌های محاسباتی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی نمی‌گذرد، اما این شبکه‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون پردازش موازی، هوشمندی و همچنین انعطاف‌پذیری جایگاه ویژه‌ای در مسائل پیچیده از قبیل شناخت الگو، خوشه‌بندی، مدل‌سازی، تخمین و شناسایی و پیش‌بینی برای خود باز کرده است.

شبکه‌های عصبی دارای کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف می‌باشند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- طبقه‌بندی، شناسایی و تشخیص الگو
- ۲- پردازش سیگنال
- ۳- پیش‌بینی سری‌های زمانی
- ۴- مدل‌سازی و کنترل
- ۵- بهینه‌سازی
- ۶- سیستم‌های خیره و فازی
- ۷- مسائل مالی، بیمه، امنیتی، بازار بورس و...
- ۸- ساخت وسایل صنعتی پزشکی و امور حمل و نقل

۴-۲-۴- مدل ریاضی نرون

نرون کوچکترین واحد پردازشگر اطلاعات است، که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد. مدل‌سازی نرون دارای سه مرحله زیر می‌باشد [۱۲]:

الف - مدل‌سازی سیناپس

سیناپس بیولوژیک بین یک اکسون و یک دندریت، بصورت اعمال وزن‌های اتصالات مدل می‌شود. بدین معنی که سیگنال دریافتی توسط دندریت ابتدا در یک ضریب (وزن) مثبت یا منفی ضرب شده و سپس به هسته منتقل می‌شود [۱۲].

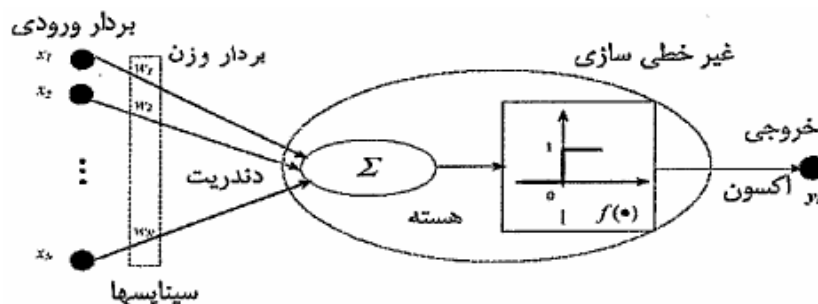
ب - مدل‌سازی هسته سلول

نحوه عمل هسته سلول بر سیگنال‌های ورودی به این صورت مدل می‌شود که ابتدا مجموع وزن‌دار تمامی سیگنال‌های ورودی محاسبه شده و سپس یک تابع محرک^۱ یا تبدیل مانند سیگموئید^۲ و یا تانژانت هیپربولیک روی این حاصل جمع اثر می‌کند. این توابع دارای ویژگی‌های زیر هستند [۱۲]:

- سیگنال‌های کوچک بصورت خطی توزیع می‌شوند.
- سیگنال‌های بزرگ به یک مقدار بیشینه محدود می‌شوند.

ج - مدل‌سازی اکسون

در نهایت، خروجی تابع محرک بصورت یک سیگنال به نرون‌های دیگر منتقل می‌شود. شکل (۲-۴) یک نرون مصنوعی را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل (۲-۴) مدل ریاضی نرون [۱۲]

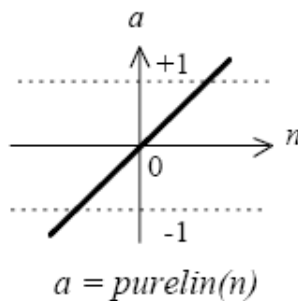
- 1 - Transfer function
- 2 - Sigmoid

۴-۳-۴- انواع توابع محرک

تابع محرک f می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد. یک تابع محرک بر اساس نیاز خاص در حل مسأله‌ای که قرار است به وسیله شبکه عصبی حل شود انتخاب می‌شود. در عمل تعداد محدودی از توابع محرک مورد استفاده قرار می‌گیرند، که در زیر به مهمترین آنها اشاره می‌شود [۱۱].

۱- تابع محرک خطی:

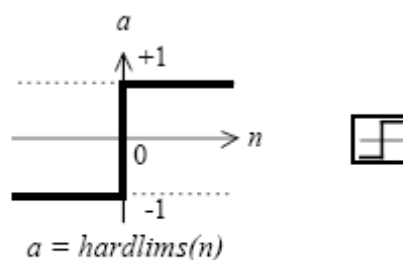
خروجی این تابع برابر ورودی آن است. تابع محرک خطی در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است [۱۱].

$$a = f(n) = n \quad (۱-۴)$$


شکل (۳-۴) تابع محرک خطی [13]

۲- تابع محرک آستانه‌ای دو مقدار حدی:

این تابع در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. در این تابع اگر آرگومان n کوچکتر از صفر باشد مقدار تابع صفر است و در غیر این صورت خروجی نرون برابر یک خواهد شد. به دلیل اینکه تابع محرک دامنه خروجی نرون را محدود می‌سازد به همین دلیل آن را تابع محدودساز نیز می‌گویند. خروجی نرون معمولاً برای اینگونه توابع در بازه متناهی $[0,1]$ یا $[-1,1]$ قرار دارد که در حالت اخیر تابع را تابع محرک آستانه‌ای دو مقدار حدی گویند [۱۱].



Symmetric Hard-Limit Trans. Funct.

شکل (۴-۴) تابع محرک محدود کننده سخت متقارن [13]

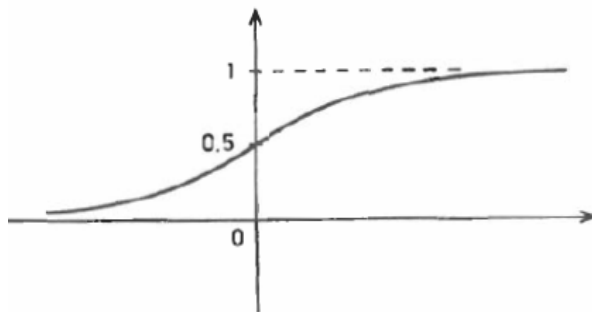
۳- تابع محرک سیگموئید:

تابع سیگموئید، یکی از محبوبترین توابع محرک می‌باشد زیرا که تابعی یکنوا و مشتق‌پذیر و از همه جالبتر دارای فرمول مشتق بسیار ساده‌ای است که آن را می‌توان به کمک خود تابع بیان کرد. تابع سیگموئید و مشتق آن به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱]:

$$y = \text{Sig}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (۲-۴)$$

$$y' = y(1-y) \quad (۳-۴)$$

شکل تابع سیگموئید به صورت زیر می‌باشد:



شکل (۴-۵) تابع محرک سیگموئید [۱۱]

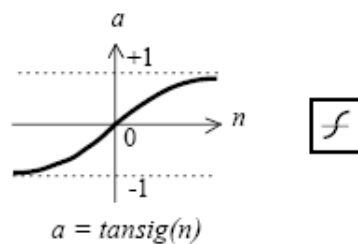
۴- تابع تانژانت هیپربولیک

از دیگر توابع محرک معروف، تابع تانژانت هیپربولیک می‌باشد. تابع تانژانت هیپربولیک و مشتق آن به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱].

$$y = \tanh(x) = \frac{1-e^{-x}}{1+e^{-x}} \quad (۴-۴)$$

$$y' = 2y(1-y) \quad (۵-۴)$$

شکل تابع تانژانت هیپربولیک به صورت زیر می‌باشد:



Tan-Sigmoid Transfer Function

شکل (۴-۶) تابع محرک تانژانت هیپربولیک [13]

۴-۴-۴- یادگیری شبکه عصبی مصنوعی [۱۱]

فرآیند یادگیری، در واقع مشخص کردن ارتباط بین ورودی و خروجی در طول زمان با تکرار در فرآیند می‌باشد. می‌دانیم که تجربه‌ها در طول زمان حاصل می‌شوند و هیچ کس آینده خود را تجربه نکرده است. میزان یادگیری ما به درجه کامل بودن اطلاعات قبلی ما بستگی دارد. در شبکه عصبی مصنوعی، حافظه شبکه در مقادیر اتصال موجود بین نرون‌ها و یا وزن‌ها ذخیره می‌شود. در این شبکه، از آموزش به معنای روند تغییر وزن‌ها تا حصول نتیجه مشخص (به دست آوردن خروجی مطلوب از شبکه) و یادگیری به معنای مرحله نهایی آموزش و تثبیت وزن‌های سیناپسی یاد می‌شود. در واقع باید گفت که پروسه یادگیری در شبکه عصبی مصنوعی از طریق تنظیم وزن‌های شبکه به نحوی صورت می‌گیرد که با اعمال مثال‌های آموزشی به شبکه، خروجی مطلوب از آن گرفته شود.

در شبکه عصبی مصنوعی، تعداد لایه‌های پنهان به نوع مسأله بستگی دارد و باید توجه داشت که به رغم اینکه افزایش تعداد نرون‌های پنهان، نتایج مثبت بسیاری به همراه دارد، باعث کاهش سرعت یادگیری شبکه و در بعضی موارد کاهش قدرت تعمیم‌دهی آن می‌شود و این امکان را به وجود می‌آورد که شبکه خطاهای مستتر در داده‌ها را نیز فرا گیرد. معمولاً شبکه‌های عصبی به دو صورت آموزش می‌بینند:

الف - آموزش با ناظر^۱

در یادگیری با ناظر، فرض بر این است که در هر مرحله از تکرار الگوریتم یادگیری، جواب مطلوب الگوی یادگیرنده از قبل آماده است. به عبارتی دیگر الگوریتم یادگیری به جواب واقعی و مطلوب دسترسی دارد. با ورود الگوی آموزش‌دهنده، خروجی شبکه محاسبه و با خروجی واقعی مقایسه می‌شود و میزان خطای یادگیری محاسبه می‌گردد. آموزش شبکه در جهت رسیدن به خروجی واقعی و کاهش خطای شبکه از طریق بروز کردن^۲ وزن‌های سیناپسی صورت می‌گیرد.

ب - آموزش بدون ناظر^۳

در یادگیری بدون ناظر به جواب مطلوب و مقدار واقعی شبکه جهت بهبود رفتار الگوی یادگیرنده دسترسی نداریم و خود شبکه باید در بین ورودی‌ها با عمل خوشه‌بندی این کار را انجام دهد. آموزش با ناظر برای شبکه‌های عصبی که از تعداد لایه‌های نرونی تشکیل شده‌اند بسیار کند صورت می‌گیرد. در

1 - Supervised learning

2 - Update

3 - Unsupervised learning

آموزش بدون ناظر یا خودسازمانده^۱، پارامترهای شبکه عصبی، فقط توسط پاسخ سیستم تنظیم و اصلاح می‌شوند. در واقع، تنها اطلاعات موجود برای آموزش شبکه، بردارهای ورودی هستند و بر خلاف آموزش با ناظر، بردار خروجی جهت آموزش وجود ندارد. به عبارتی به شبکه هیچ نمونه‌ای از تابعی که قرار است بیاموزد داده نمی‌شود. در این نوع یادگیری، اطلاعات موجود در داده‌های آموزشی بصورت پیوسته به شبکه عصبی عرضه می‌شوند، تا شاخص‌های همگرایی قانع کننده‌ای بوجود آید. در انتخاب داده‌ها، دو نکته اساسی باید رعایت شود. نکته اول، داشتن داده‌های آموزشی کافی قابل عرضه به شبکه است. نکته دوم، حذف هر داده‌ای است که در آموزش شبکه نقشی ندارد. اما در حذف این داده‌ها باید بسیار محتاط بود چرا که حذف بعضی داده‌های به ظاهر کم ارزش، از توان اجرایی شبکه می‌کاهد.

۴-۴-۵- توقف آموزش [۱۴]

هنگامی که یک شبکه عصبی را آموزش می‌دهیم، با مجموعه‌ای از داده‌ها شروع می‌کنیم. نخستین گام این است که داده‌ها را به دو مجموعه آموزش و آزمون تقسیم کنیم. با استفاده از مجموعه آموزشی داده‌ها، شبکه را تعلیم می‌دهیم. سپس با استفاده از مجموعه آزمون، آن را آزمایش می‌کنیم، تا ببینیم چگونه از عهده داده‌هایی که قبلاً ندیده است بر می‌آید.

در طی آموزش، خطای بین خروجی مطلوب و خروجی واقعی اندازه‌گیری می‌شود و هدف کاهش این خطا با تنظیم وزن‌هاست. بنابراین در طول آموزش، خطا (یا به عبارت دقیق‌تر مربع خطا) باید کاهش یابد و آموزش زمانی که این خطا به اندازه کافی کوچک شود، متوقف می‌شود.

تمایل طبیعی این است که بخواهیم خطا تا حد ممکن کوچک باشد، بطوری که شبکه عصبی بتواند داده‌های آموزشی را با بیشترین دقت ممکن بازسازی کند. اما تجربه نشان می‌دهد که شبکه هرگز به آن خوبی که بر روی مجموعه آموزش عمل می‌کند بر روی مجموعه آزمون عمل نمی‌کند. این پدیده به عنوان وراآموزی^۲ شناخته می‌شود و گفته می‌شود که شبکه برای داده‌های آموزشی برازش زیادی^۳ دارد.

همان طور که قبلاً گفته شد، از خواص اساسی شبکه عصبی قابلیت فراگیری و تعمیم‌دهی آن است. با آموزش زیادی داده‌ها، قابلیت تعمیم‌دهی کاهش می‌یابد. بنابر این اکنون سؤال این است که چگونه می‌دانیم که چه موقع آموزش را متوقف کنیم تا از وراآموزی اجتناب کنیم؟

-
- 1 - Self organized
 - 2 - Over training
 - 3 - Over fit

راه حل این است که مجموعه داده‌ها را به دو یا سه قسمت تقسیم کنیم. این مجموعه‌ها معمولاً مجموعه آموزش، مجموعه آزمون و مجموعه تست نامیده می‌شوند. آموزش با استفاده از مجموعه آموزش انجام می‌شود و خطا برای تنظیم وزن‌ها به کار گرفته می‌شود. با این وجود، در حین آموزش، داده‌های آزمون نیز به شبکه نشان داده شده و خطا ثبت می‌شود. باید توجه شود که هنگامی که داده‌های آزمون به شبکه نشان داده می‌شود، وزن‌ها تنظیم نمی‌شود بلکه فقط پس از نشان دادن داده‌های آموزشی به شبکه با استفاده از قاعده انتشار خطا وزن‌ها تنظیم می‌شوند.

در حین فرآیند آموزش، خطای بین خروجی مطلوب و خروجی واقعی باید کاهش یابد. اما، خطای داده‌های آزمون نیز باید کاهش یابد ولی بیشتر از خطای داده‌های آموزش باشد. در مرحله‌ای از آموزش، کاهش خطای داده‌های آزمون متوقف می‌شود و حتی ممکن است خطا افزایش یابد. این وقتی است که آموزش زیادی شروع می‌شود و شبکه شروع به برازش زیادی داده‌های آموزشی می‌کند. اگر آموزش در نقطه‌ای که خطای داده‌های آزمون شروع به افزایش می‌کند متوقف شود، آنگاه از آموزش زیادی می‌توان اجتناب کرد. عملاً بجای اینکه شبکه به بهای عملکرد بدتری روی مجموعه آزمون، عملکرد بهتری در مورد مجموعه آموزش ارائه دهد، مصالحه‌ای صورت گرفته است که شبکه عملکرد خوبی هم روی مجموعه آموزش و هم روی مجموعه آزمون داشته باشد.

از داده‌های تست می‌توان برای تست و مقایسه توانایی پیش‌بینی شبکه در برابر روابط موجود متغیر مورد مطالعه استفاده کرد.

۴-۴-۶- معرفی شبکه‌های عصبی مورد استفاده

الف - شبکه پرسپترون^۱

شبکه عصبی پرسپترون، اولین شبکه کاربردی در تاریخ شبکه‌های عصبی مصنوعی است. این شبکه قادر است، با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، که اغلب زیاد هم نیستند، یک نگاشت غیرخطی را با دقت دلخواه انجام دهد. این همان چیزی است که در بسیاری از مسائل فنی مهندسی به عنوان راه حل اصلی مطرح می‌باشد [۱۱].

الگوریتم یادگیری پرسپترون، الگوریتمی ساده و مفهومی است. اساس یادگیری پرسپترون که مبنای بسیاری از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر شبکه‌های عصبی با ناظر است بدین قرار می‌باشد که رفتار خوب

تشویق می‌شود و رفتار بد مورد سرزنش قرار می‌گیرد. بنابراین در این شبکه به نرون اجازه می‌دهیم که از اشتباهات قبلی خود بیاموزد که در آینده چگونه رفتار کند. اگر جواب شبکه همراه با خطا باشد، احتمال این خطا را در آینده کم می‌کنیم و اگر جواب درست باشد، وضع موجود را تغییر نمی‌دهیم [۱۱].

شبکه پرسپترون، شبکه‌ای دودویی^۱ است که از یک لایه ورودی و یک لایه خروجی تشکیل شده است. نرون‌ها در شبکه پرسپترون از تابع محرک علامت^۲ برخوردار هستند [۱۱].

شیوه یادگیری پرسپترون به صورت زیر خلاصه می‌شود [۱۲]:

الف - ضرائب وزنی به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

ب - ورودی به مدل ارائه می‌شود.

ج - مقدار خروجی با توجه به مقایسه مجموع وزن دار ورودی‌ها و مقدار آستانه (بایاس)، محاسبه می‌شود.

د - برای کاهش خطا، ضرایب وزنی تغییر می‌کنند (برای تقویت تصمیمات درست و تضعیف تصمیمات نادرست)

ه - بازگشت به گام ب تا حصول میزان خطای قابل چشم‌پوشی [۱۲].

اصولاً الگوریتم فوق نهایتاً به یک ماتریس وزنی ثابت همگرا می‌شود. یعنی پرسپترون پس از n بار تکرار با میزان خطای مشخص به جواب مورد نظر همگرا می‌شود.

اشکال عمده‌ای که به پرسپترون وارد است این می‌باشد که پرسپترون فقط می‌تواند الگوهای را از هم جدا کند که به صورت خطی از هم جداپذیر باشند. این مسئله برای اولین بار توسط مینسکی^۳ و پاپرت^۴ مطرح شد که باعث رکود عجیبی در تمایل به کاربرد شبکه‌های عصبی در محافل علمی پیش آمد. تا اینکه مدل پیشنهادی مک کولچ و پیتز تحت عنوان پرسپترون چند لایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا همچون انفجاری، میزان علاقه عمومی به شبکه عصبی را به شدت افزایش داد و این مطلب تا آنجا ادامه یافت که در سال ۱۹۸۶ رامله‌هارت و مک‌لند صورت جدیدی از پرسپترون‌ها با توابع محرک غیر پله‌ای را به نام پرسپترون چند لایه^۵ (MLP) ابداع کردند. راه حل مشکل پرسپترون در معرفی پرسپترون چند لایه (MLP) ذکر خواهد شد [۱۲].

1 - Binary function

2 - Sign function

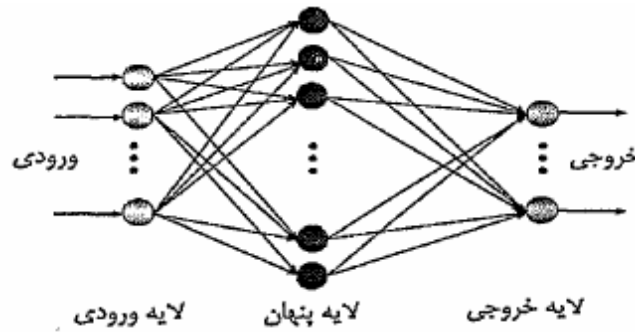
3 - Minsky

4 - Papert

5 - Multi Layer Perceptron (MLP)

ب - شبکه پرسپترون چند لایه (MLP)

ساختار عمومی شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. به منظور رفع مشکلات پرسپترون، تغییرات زیر در قالب شبکه (MLP) صورت گرفت:



شکل (۷-۴) شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) [۱۲]

۱- تغییر تابع محرک نرون‌ها

همانگونه که ذکر شد، تابع محرک در شبکه پرسپترون تابع علامت است که تابعی است دودویی. برای رفع این مشکل حدود بالا و پایین این تابع (یعنی صفر و یک) حفظ شده ولی بین این دو مقدار به صورت پیوسته و شیب‌دار در آمده است.

بدین منظور، فاصله بین صفر و یک یا به صورت خطی (تابع محرک خطی) و یا به صورت غیرخطی تغییر می‌کند (توابع محرک سیگموئید، تانژانت هیپربولیک و ...) [۱۲].

۲- چند لایه شدن شبکه

شبکه MLP دارای یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و چند لایه میانی (پنهان) است. هر نرون در هر لایه به تمامی نرون‌ها در لایه بعدی متصل است [۱۲].

۳- الگوریتم آموزش جدید با قاعده پس‌انتشار خطا^۱

قاعده یادگیری پرسپترون چند لایه را قاعده کلی دلتا یا پس‌انتشار خطا می‌نامند. در این الگوریتم ابتدا خروجی شبکه محاسبه شده، خطای نظیر آن تعیین می‌شود و این خطا به سمت لایه‌های قبلی

(از لایه خروجی به طرف لایه‌های قبلی) منتشر می‌شود. میزان تغییر وزن اتصالات بین نرونی تابعی از این خطای منتشر شده است [۱۲].

۴-۴-۷- کاربردهای شبکه MLP

شبکه MLP، همواره به عنوان اولین نامزد در حل مسائل مربوط به ایجاد نگاشت غیرخطی مطرح است و به جرأت می‌توان گفت پرسپترون چند لایه، برای نگاشت غیرخطی، پر کاربردترین شبکه عصبی مصنوعی در دنیای مهندسی است. این شبکه قدرت شناسایی ویژگی^۱ را دارا است. همچنین شبکه، دارای قدرت تعمیم‌دهی بالاست و می‌تواند الگوها را دسته‌بندی^۲ و در حالت کلی‌تر، خوشه‌بندی کند. مهمتر از همه، یک ابزار قدرتمند در ایجاد نگاشت‌های غیرخطی بین دو فضای ورودی و خروجی آن هم با ابعاد بزرگ می‌باشد. این شبکه روابط ذاتی درون داده‌ها را کشف کرده و درون وزن‌های اتصالات به صورت گسترده ذخیره می‌کند [۱۲].

۴-۴-۸- نحوه عملکرد شبکه در پردازش اطلاعات

الف - پردازش پیشرو^۳

در این نوع پردازش، مسیر حرکت اطلاعات درون شبکه یکطرفه و از هر لایه به لایه بعد است. این نوع شبکه‌ها را شبکه‌های پیشخور^۴ هم می‌گویند [۱۱].

ب- پردازش پسرو^۵

در این نوع پردازش، مسیر حرکت اطلاعات دو طرفه است یعنی هر نرون می‌تواند به خودش پسخور داشته باشد. به عبارت دیگر خروجی نرون در لحظه^۶ t (علاوه بر سیگنال‌های دریافتی از سایر نرون‌های لایه قبلی)، تابعی از خروجی همان نرون در زمان $t-1$ نیز می‌باشد. این شبکه‌ها موسوم به شبکه‌های پسخور^۶ یا برگشتی^۷ هستند [۱۱].

-
- 1 - Feature detection
 - 2 - Classification
 - 3 - Forward
 - 4 - Feedforward
 - 5 - Backward
 - 6 - Feedback
 - 7 - Recurrent

۴-۹- الگوریتم پس‌انتشار خطا [۱۲]

الگوریتم پس‌انتشار خطا، روشی برای پیدا کردن وزن‌ها در یک شبکه پیشخور چند لایه است. این الگوریتم تاکنون بهترین جواب را برای مسائل هیدرولیکی داده است. این الگوریتم مختص مسائلی است که هدف، پیش‌بینی کردن را دنبال می‌کند. به همین دلیل برای پیش‌بینی متغیرهای آبشستگی نیز در تحقیق حاضر از این الگوریتم بهره گرفته می‌شود. همانگونه که قبلاً ذکر شد، پس از محاسبه خروجی در لایه آخر، برای هر نرون خروجی، میزان خطا محاسبه شده و به عقب منتشر می‌شود. برای اصلاح ضرائب وزنی مربوط به نرون‌های پنهان، فرض بر این است که هر چه مقدار خطای نرون‌های لایه خروجی متصل به نرون مخفی بیشتر باشد، وزن‌های مربوط به آن نرون پنهان باید بیشتر اصلاح شوند. حال باید دید که این میزان خطا برای نرون‌های خروجی و لایه‌های پنهان چگونه محاسبه می‌شود. ابتدا نمادهای زیر را تعریف می‌کنیم:

E_p : مقدار خطای الگوی p

t_{pj} : خروجی مطلوب (هدف) الگوی p در گره j

o_{pj} : خروجی محاسبه شده الگوی p در گره j

w_{ij} : ضریب وزنی خط اتصال از گره i به j

فرض بر این است که تابع خطا متناسب با مجذور تفاوت خروجی واقعی و خروجی مطلوب برای تمامی الگوهای عرضه شده به شبکه است.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (۴-۶)$$

ورودی خالص نرون j ام برای الگوی p برابر است با:

$$net_{pj} = \sum_i w_{ij} o_{pi} \quad (۴-۷)$$

خروجی نرون j ام نتیجه تأثیر تابع محرک است.

$$o_{pj} = f_i(net_{pj}) \quad (۴-۸)$$

با استفاده از قاعده زنجیره‌ای مشتق داریم:

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E_p}{\partial net_{pj}} \cdot \frac{\partial net_{pj}}{\partial w_{ij}} \quad (۴-۹)$$

با در نظر گرفتن عبارت دوم رابطه (۴-۹) و جایگزینی آن در رابطه (۴-۷) داریم:

$$\frac{\partial net_{pj}}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial}{\partial w_{ij}} \sum_k w_{kj} o_{pk} = \sum_u \frac{\partial w_{ik}}{\partial w_{ij}} o_{pk} = o_{pi} \quad (۴-۱۰)$$

زیرا در همه موارد $\frac{\partial w_{ik}}{\partial w_{ij}}$ برابر صفر است، مگر وقتی که $k = i$ باشد که در این صورت برابر یک است.

مقدار تغییر خطا را می‌توان تابعی از ورودی خالص هر واحد به صورت زیر تعریف کرد:

$$\delta_{pj} = -\frac{\partial E_p}{\partial net_{pj}} \quad (11-4)$$

رابطه فوق به صورت در می‌آید:

$$\delta_{pj} o_{pi} = -\frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} \quad (12-4)$$

در نتیجه کاهش خطای E_p به معنی تغییر ضرایب وزنی متناسب با $\delta_{pj} o_{pi}$ خواهد بود به عبارتی:

$$\Delta_p(w_{ij}) = \eta \cdot \delta_{pj} \cdot o_{pi} \quad (13-4)$$

آنچه اکنون باید بدانیم پیدا کردن رابطه‌ای مناسب برای δ_{pj} است. به کمک رابطه (۱۱-۴) و قاعده زنجیره‌ای مشتق داریم:

$$\delta_{pj} = -\frac{\partial E_p}{\partial net_{pj}} = -\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} \cdot \frac{\partial o_{pj}}{\partial net_{pj}} \quad (14-4)$$

عبارت دوم رابطه فوق از رابطه (۸-۴) نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial o_{pj}}{\partial net_{pj}} = f'_j(net_{pj}) \quad (15-4)$$

با استفاده از رابطه (۶-۴) می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} = -(t_{pj} - o_{pj}) \quad (16-4)$$

بنابر این:

$$\delta_{pj} = f'_j(net_{pj}) \cdot (t_{pj} - o_{pj}) \quad (17-4)$$

عبارت فوق برای محاسبه خطا در لایه خروجی کاربرد دارد و برای نرون‌های پنهان مفید نیست، چرا که خروجی مطلوب (هدف) آنها در دست نیست. اگر نرون j ام در لایه مخفی واقع باشد، با استفاده از قاعده زنجیره‌ای مشتق می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} = \sum_k \frac{\partial E_p}{\partial net_{pk}} \cdot \frac{\partial net_{pk}}{\partial o_{pj}} = \sum_k \frac{\partial E_p}{\partial net_{pk}} \cdot \frac{\partial}{\partial o_{pk}} \cdot \sum_i w_{ik} \cdot o_{pi} \quad (18-4)$$

با استفاده از روابط (۷-۴) و (۸-۴) و با عنایت به اینکه مشتق جزئی دوم، تنها در یک مورد برابر یک است رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} = -\sum_k \delta_{pk} w_{jk} \quad (۱۹-۴)$$

و در نهایت با جایگزینی رابطه (۱۹-۴) و (۱۴-۴) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\delta_{pj} = f'_j(\text{net}_{pj}) \cdot \sum_k \delta_{pk} w_{jk} \quad (۲۰-۴)$$

۴-۴-۱۰- الگوریتم آموزش پرسپترون چند لایه [۱۲]

قاعدهٔ پس‌انتشار خطا به توابعی نیاز دارد که بطور پیوسته مشتق پذیر باشند (توابع هموار). مراحل این الگوریتم به اختصار به شرح زیر است.

۱- تعیین مقادیر اولیهٔ ضرائب وزنی (به صورت تصادفی).

۲- عرضهٔ الگوهای ورودی و الگوهای خروجی مطلوب (هدف) به شبکه. ورودی بایاس برابر عدد یک و وزن آن w_0 انتخاب شود.

اگر مسأله مورد نظر، مسأله تداعی باشد، X_p (بردار ورودی) و T_p (بردار خروجی هدف) دو بردار تداعی شونده هستند. در مسأله طبقه‌بندی الگوها، تمام عناصر T_p صفر هستند مگر یکی از عناصر که برابر یک است و آن طبقه‌ای را نشان می‌دهد که X_p در آن قرار دارد.

۳- محاسبهٔ خروجی

$$y_{pi} = f \left[\sum_{i=0}^{n-1} w_i x_i \right] \quad (۲۱-۴)$$

تغییر ضرائب وزنی از لایهٔ خروجی به سمت عقب.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \cdot \delta_{pj} \cdot o_{pj} + \alpha \cdot [w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)] \quad (۲۲-۴)$$

η ، آهنگ یادگیری و α ، ضریب اندازه حرکت می‌باشد که اعدادی بین صفر و یک ($0 < \alpha, \eta < 1$) هستند و در تنظیم سرعت یادگیری شبکه و ارضای شرایط لازم برای همگرایی، نقش مهمی دارند.

$w_{ij}(t)$ معرف ضریب وزنی از گره i به گره j در زمان (گام) t و δ_{pj} نمایانگر خطای مربوط به الگوی P در گره j است.

فرمول ارائه شده برای میزان این خطا بسته به اینکه نرون در لایهٔ خروجی باشد یا در لایهٔ پنهان، متفاوت است.

برای نرون لایهٔ خارجی:

$$\delta_{pj} = k \cdot o_{pj} \cdot (1 - o_{pj}) \cdot (t_{pj} - o_{pj}) \quad (۲۳-۴)$$

برای نرون لایه پنهان:

$$\delta_{pj} = k o_{pj} (1 - o_{pj}) \cdot \sum_k \delta_{pk} - w_{jk} \quad (24-4)$$

که واحد k در لایه بعد از لایه مربوط به واحد j واقع است.

سپس میزان تابع خطای کلی شبکه^۱ محاسبه شده و با مقدار قابل قبول مقایسه می‌شود و لزوم بازگشت به گام ۲ یا توقف الگوریتم بررسی می‌شود. نکته مهمی که باید به آن اشاره شود، این است که آهنگ یادگیری η و ضریب اندازه حرکت α ($0 < \alpha, \eta < 1$) در فرمول تغییر وزن شبکه تأثیر بسار قابل توجهی دارد.

η ، به نوعی بیانگر سرعت یادگیری شبکه است. مقدار کوچک آن باعث افزایش زمان یادگیری شبکه می‌شود. اما در این حالت با تعداد تکرارهای کافی می‌توان به یک شبکه آموزش دیده دست یافت. مقادیر بزرگ η (نزدیک به یک) باعث افزایش سرعت یادگیری شده، ولی پس از مدتی که وزن‌ها تا حدودی به مقدار بهینه نزدیک شد، مقدار بزرگ آن می‌تواند باعث عدم رسیدن به بهینه‌ترین حالت (رسیدن به کمینه مطلق) شود. زیرا گام تغییر وزن را بزرگ انتخاب کرده‌ایم. با توجه به موارد فوق توصیه می‌شود η به صورت یک تابع دینامیکی وابسته به زمان تعریف شود به این صورت که در ابتدای آموزش مقدار آن نزدیک به یک باشد و رفته‌رفته کمتر شود.

همچنین در قاعده یادگیری پس‌انتشار خطا برای رهایی از کمینه‌های محلی، جمله اندازه حرکت پیش‌بینی شده است که با وارد کردن شوکی به سیستم، آن را از حالت یادگیری کاذب خارج می‌کند. اما باید توجه داشت که مقدار بیش از حد آن می‌تواند باعث واگرایی شبکه شود. بنابر این برای پیدا کردن مقدار بهینه آن از روند سعی و خطا استفاده می‌شود.

۴-۱۱- مشکلات پرسپترون چند لایه

این شبکه فقط در محدوده داده‌ها می‌تواند پاسخ دهد و در بعضی موارد آموزش آن زمانبر است. یکی از مشکلات اساسی این شبکه این است که شبکه در هنگام آموزش ممکن است دچار ورآموزی یا یادگیری کاذب شود.

در بحث ایجاد نگاشت غیرخطی بوسیله شبکه عصبی، ممکن است حالتی پیش آید که شبکه، داده‌های آموزشی را به خوبی فرا گرفته و گویی که آنها را در خود ذخیره می‌کند. اما عملکرد آن در قبال

داده‌های آزمون به مراتب بدتر از عملکرد آن در قبال داده‌های آموزش باشد. چنین حالتی اصطلاحاً وراآموزی نامیده می‌شود.

در صورت وجود نویز در داده‌های آموزش و آزمون، اگر به دلیل ساختار بسیار حجیم (تعداد نرون‌های زیاد در لایه پنهان) و یا به دلیل تعداد چرخه‌های آموزشی زیاد، داده‌های آموزشی را بیش از اندازه فرا بگیرد، عملکرد آن در قبال داده‌های آزمون بد خواهد بود. برای اجتناب از چنین پدیده‌ای لازم است بر روی تعداد چرخه‌های آموزشی و تعداد نرون‌های لایه پنهان عمل بهینه‌سازی انجام شود [۱۲].

۴-۵- خلاصه

در این فصل با شبکه‌های عصبی مصنوعی آشنا شدیم. در ابتدا تاریخچه‌ای از شبکه‌های عصبی ارائه شد. سپس خلاصه‌ای از عملکرد شبکه‌های عصبی زیستی بیان شد. در ادامه به ویژگی‌های مشترک شبکه‌های عصبی زیستی و مصنوعی اشاره شد. همچنین کاربردهایی از شبکه‌های عصبی مصنوعی بیان شد. در ادامه مدل ریاضی نرون و انواع توابع محرک متداول و مهم مورد بررسی قرار گرفتند. سپس فرآیند یادگیری شبکه عصبی و انواع روش‌های آموزش شبکه و شرایط توقف آموزش ارائه شد.

انواع شبکه‌های عصبی مورد استفاده از جمله شبکه پرسپترون و شبکه پرسپترون چند لایه (*MLP*) و کاربردهای آنها تشریح شدند. در ادامه نحوه پردازش اطلاعات در شبکه بیان شد. الگوریتم پس‌انتشار خطا و الگوریتم شبکه پرسپترون چند لایه به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعدی کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی آبستگي پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب و نتایج حاصل از تحلیل شبکه‌های عصبی ارائه می‌شود.

فصل پنجم

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی

در پیش‌بینی آتش‌سوزی پایین دست

سازه‌های کنترل شیب

۵-۱- مقدمه:

روش معمول برای یافتن ارتباط بین پارامترهای ابعاد چاله آبخستگی با عوامل مؤثر بر آن، به این صورت می‌باشد که می‌توان توسط روش‌های آنالیز ابعادی، ابتدا پارامترهای بدون بعد مؤثر بر مسأله مورد نظر را تشخیص داد و سپس با انجام آزمایشات مختلف نگاشت ریاضی این پارامترها تعیین می‌شود. نکته قابل توجه این است که با بالا رفتن تعداد پارامترهای موجود در مسأله، رسیدن به یک تابع ریاضی که دارای دقت مناسبی باشد، مشکلتر می‌شود. از این رو معمولاً برای یافتن تابع ریاضی، با استفاده از فرضیاتی مبتنی بر تجربه محققین قبلی از بعضی اعداد بدون بعد صرف‌نظر می‌شود و همین مسأله منشأ پیدایش فرمول‌ها و روابط مختلف خواهد شد.

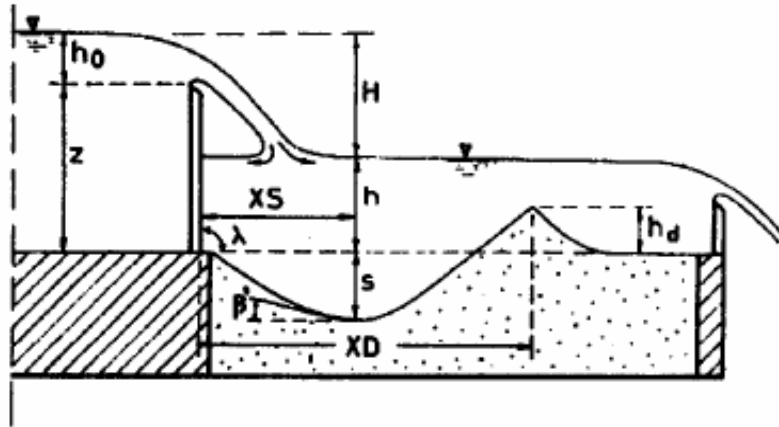
در شبکه عصبی، نیازی به یافتن تابع ریاضی معرف ارتباط متغیرها نیست و شبکه عصبی با توجه به روابط ذاتی میان داده‌ها به ارتباط میان آنها پی برده و پس از یادگیری، آموخته‌های خود را به حالت‌های مشابه تعمیم می‌دهد. شبکه‌های عصبی، راهکاری جدید در حل مسائل مهندسی از جمله تخمین آبخستگی می‌باشند که می‌توانند مشکلات ذکر شده فوق را حل نمایند.

توکلی‌زاده و کاشفی‌پور در سال ۲۰۰۸ [15]، آبخستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل کردند. آنها برای بررسی صحت مدل شبکه‌های عصبی، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی و ضریب $RMSE$ استفاده کردند. در این پایان‌نامه از شاخص‌های آماری مناسبتری استفاده شده است. همچنین نتایج بدست آمده از نتایج آنها بهتر می‌باشد.

۵-۲- کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی آبخستگی پایین‌دست

سازه‌های کنترل شیب

همانطور که در فصول قبل ذکر شد، پدیده آبخستگی ناشی از عمل فرسایشی جریان آب است و به ویژگی‌های جریان، مشخصات هیدرولیکی و هندسه کانال بستگی دارد. شکل (۵-۱) طرح کلی یک سازه کنترل شیب و آبخستگی پایین‌دست آن را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱) طرح آبشستگی پایین‌دست سازه کنترل شیب [8]

عوامل مؤثر بر پدیده آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، به صورت رابطه‌ی تابعی زیر بیان می‌شوند [8]:

$$y = F(z, b, B, h, Q, \rho_s, \rho, g, d_{50}, d_{90}) \quad (۵-۱)$$

y متغیر آبشستگی، z ارتفاع سازه کنترل شیب، b و B به ترتیب عرض سرریز و عرض کانال، h عمق آب پایین‌دست سرریز، Q دبی جریان، ρ_s, ρ به ترتیب دانسیته جرمی آب و رسوبات، d_{90}, d_{50} به ترتیب قطری که ۵۰٪ و ۹۰٪ ذرات از آن ریزتراند و g شتاب ثقل می‌باشد.

برای پیش‌بینی آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب با استفاده از شبکه‌های عصبی، چهار متغیر بی‌بعد شامل نسبت عمق آبشستگی بیشینه به ارتفاع سازه s/z ، نسبت فاصله افقی بین تاج سرریز و مقطع عمق آبشستگی بیشینه به ارتفاع سازه XS/z ، نسبت فاصله افقی بین تاج سرریز و تاج پشته ته‌نشین شده به ارتفاع سازه XD/z و نسبت ارتفاع پشته روی تراز بستر دست‌نخورده به ارتفاع سازه h_d/z مورد تحلیل قرار می‌گیرند (شکل (۵-۱)). برای برقراری مدل‌های شبکه عصبی برای هر متغیر، پارامترهای بی‌بعد زیر با توجه به تحلیل خودتشابهی دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴) [8] که در فصل سوم به آن اشاره شد، با استفاده از عوامل هیدرولیکی تولید شده‌اند.

برای متغیرهای بی‌بعد s/z و XD/z ، پنج پارامتر کلیدی بی‌بعد به صورت زیر تولید شده‌اند:

$$\frac{s}{z} = f_1 \left(\frac{b}{z}, \frac{h}{H}, A_{50}, \frac{d_{90}}{d_{50}}, \frac{b}{B} \right) \quad (۵-۲)$$

$$\frac{XD}{z} = f_2 \left(\frac{b}{z}, \frac{h}{H}, A_{50}, \frac{d_{90}}{d_{50}}, \frac{b}{B} \right) \quad (۵-۳)$$

A_{50} طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A_{50} = \frac{Q}{bz \left[gd_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{1/2}} \quad (۴-۵)$$

دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴) [8] نشان دادند که تأثیر d_{90} روی XS و h_d بیش از تأثیر d_{50} می‌باشد. بنابراین برای متغیرهای بی‌بعد XS/z و h_d/z ، از پارامتر A_{90} بجای پارامتر A_{50} استفاده می‌شود. پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر XS/z به صورت زیر تولید شده‌اند:

$$\frac{XS}{z} = f_3 \left(\frac{b}{z}, \frac{h}{H}, A_{90}, \frac{b}{B} \right) \quad (۵-۵)$$

A_{90} طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A_{90} = \frac{Q}{bz \left[gd_{90} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{1/2}} \quad (۶-۵)$$

پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر h_d/z به صورت زیر تولید شده‌اند:

$$\frac{h_d}{z} = f_4 \left(\frac{h}{H}, A_{90}, \frac{d_{90}}{d_{50}}, \frac{b}{B} \right) \quad (۷-۵)$$

۵-۲-۱- مجموعه داده‌های استفاده شده برای تحلیل بوسیله شبکه‌های عصبی

با توجه به مطالب ذکر شده در قسمت‌های قبل، برای استفاده از قابلیت پیش‌بینی شبکه‌های عصبی، نیاز به داده‌های ورودی داریم. داده‌هایی که برای تحلیل بوسیله شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، داده‌هایی هستند که در فصل سوم توسط محققین مختلف در زمینه پیش‌بینی آبستنگی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب، ارائه شدند. داده‌هایی که انتخاب شده‌اند در متغیرهای اندازه‌گیری شده‌شان متفاوت هستند.

اما نکته قابل ذکر قبل از بکار بردن داده‌ها این است که باید عمل پیش‌پردازش داده‌ها روی آنها انجام شود. عبارت پیش‌پردازش دارای مفهوم وسیعی است. این عمل شامل انتخاب متغیرهای مؤثر، انتخاب الگوهای آموزش و آزمون و دسته‌بندی الگوها می‌شود. با توجه به اینکه شبکه‌های عصبی ذاتاً فاقد قدرت برون‌یابی بالا هستند و توانایی تعمیم‌دهی آنها فقط در چارچوب درونیایی مطرح می‌شود، انتخاب داده‌های آموزشی بسیار مهم به نظر می‌رسد. بدین منظور باید سعی شود که داده‌های آموزشی تا حد ممکن غنی و حاوی اطلاعات کافی برای آموزش باشند. یعنی حاوی تمامی حالات ممکن شامل داده‌های حدی (کمینه و بیشینه) بوده و گسترش الگوها در یک طیف وسیع و کامل باشد.

با عنایت به موارد بالا برای همه متغیرها، حدود ۶۰٪ از کل داده‌های موجود برای آموزش شبکه، حدود ۲۰٪ داده‌ها برای آزمون و حدود ۲۰٪ مابقی برای تست و مقایسه شبکه با روابط موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای متغیر s/z ، مجموع ۱۸۲ داده مورد استفاده به قرار زیر می‌باشد:

۱ - اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ورونس (۱۹۳۷) که شامل ۳۶ داده آزمایشگاهی می‌شود. این داده‌ها در جدول (۳-۴) فصل ۳ موجود می‌باشند.

۲ - اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی موسی (۱۹۹۸) که شامل ۱۹ داده آزمایشگاهی می‌شود. این داده‌ها در جدول (۳-۵) فصل ۳ موجود می‌باشند.

۳ - اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) که شامل ۱۱۴ داده آزمایشگاهی می‌شود. این داده‌ها در جدول (۳-۶) فصل ۳ موجود می‌باشند.

۴ - داده‌های تجربی آبراهه میسیاگا که شامل ۱۳ داده می‌شود. این داده‌ها در جدول (۳-۸) فصل ۳ موجود می‌باشند.

برای متغیرهای h_a/z ، XD/z ، XS/z ، مجموع ۱۱۴ داده مورد استفاده به قرار زیر می‌باشد.

۱ - اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دی‌آگوستینو (۱۹۹۴) که شامل ۱۱۴ داده آزمایشگاهی می‌شود. این داده‌ها در جدول (۳-۶) فصل ۳ موجود می‌باشند.

۵-۳- پارامترهای آماری صحت‌سنجی مدل

سه پارامتر آماری که برای بررسی صحت و مقایسه مدل‌های شبکه عصبی بکار می‌روند، شامل موارد

زیر هستند.

۱- درصد خطا

درصد خطا به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$e_i = \left(\frac{|X_p - X_m|}{X_m} \right) \times 100 \quad (۸-۵)$$

X_m = مقدار اندازه‌گیری شده متغیر (مقدار واقعی یا مطلوب)

X_p = مقدار پیش‌بینی شده متغیر با مدل مناسب

۲- میانگین خطا^۱

میانگین خطا به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (9-5)$$

n = تعداد داده‌ها

۳- انحراف معیار^۲ خطا

این معیار آماری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10-5)$$

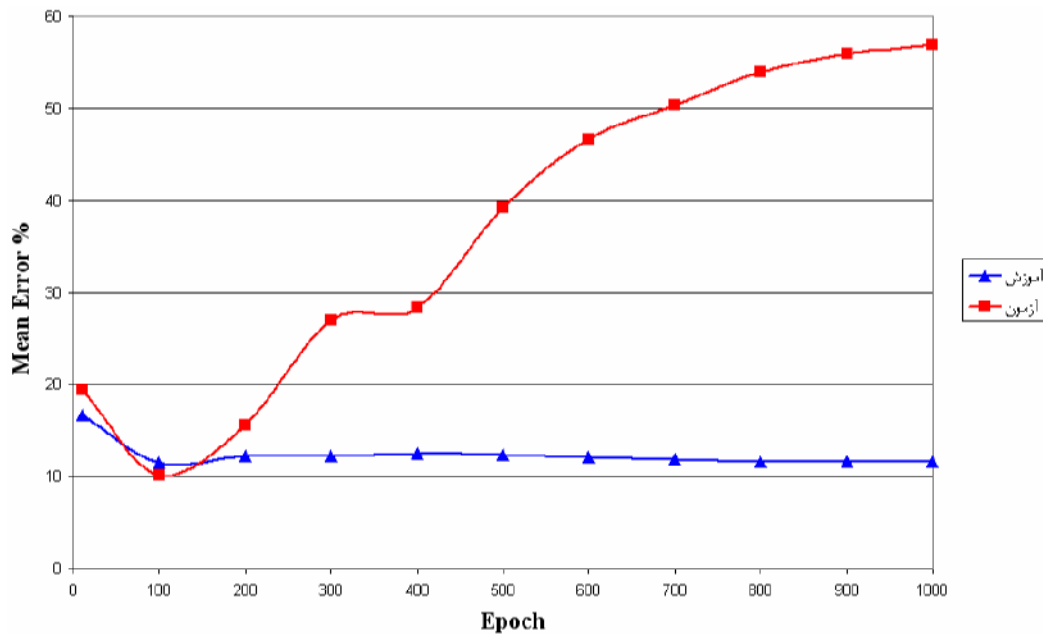
۵-۴- تحلیل شبکه‌های عصبی و نتایج حاصل

۵-۴-۱- عمق آبشستگی بیشینه S

بمنظور پیش‌بینی عمق آبشستگی بیشینه S ، پنج پارامتر بی‌بعد شامل b/z ، h/H ، A_{50} ، d_{90}/d_{50} و b/B به عنوان پارامترهای ورودی به شبکه استفاده می‌شوند و در لایه خارجی نسبت بی‌بعد s/z قرار داده می‌شود. در لایه خارجی از یک نرون با تابع محرک خطی استفاده می‌شود. اما برای انتخاب تعداد و نوع توابع محرک نرون‌های لایه پنهان و همچنین تعداد چرخه‌های^۳ آموزشی باید از فرآیند سعی و خطا استفاده شود. از آنجا که از قاعده پس‌انتشار خطا برای پیدا کردن وزن‌ها در شبکه استفاده می‌شود، لذا در لایه پنهان باید از توابع محرک مشتق‌پذیر استفاده شود (تابع سیگموئید، تابع تانژانت هیپربولیک یا تابع خطی). فرآیند سعی و خطا به این صورت انجام می‌شود که ابتدا یکی از انواع توابع محرک در لایه پنهان انتخاب می‌شود. سپس با انتخاب تعداد نرون در لایه پنهان و ثابت نگه داشتن آن، تعداد چرخه‌های متفاوت را به شبکه اعمال می‌کنیم. در چرخه‌ای که مجموع خطاهای داده‌های آموزش و داده‌های آزمون کمترین مقدار باشد، به عنوان تعداد چرخه بهینه انتخاب می‌شود. این کار را می‌توان با عوض کردن نوع تابع محرک و تعداد نرون‌های لایه پنهان دوباره تکرار کرد. نهایتاً از بین جواب‌های بهینه، بهترین جواب انتخاب می‌شود و محاسبات بعدی شبکه بر اساس آن انجام خواهد شد.

-
- 1 - Mean error
 - 2 - Standard deviation
 - 3 - Epoch

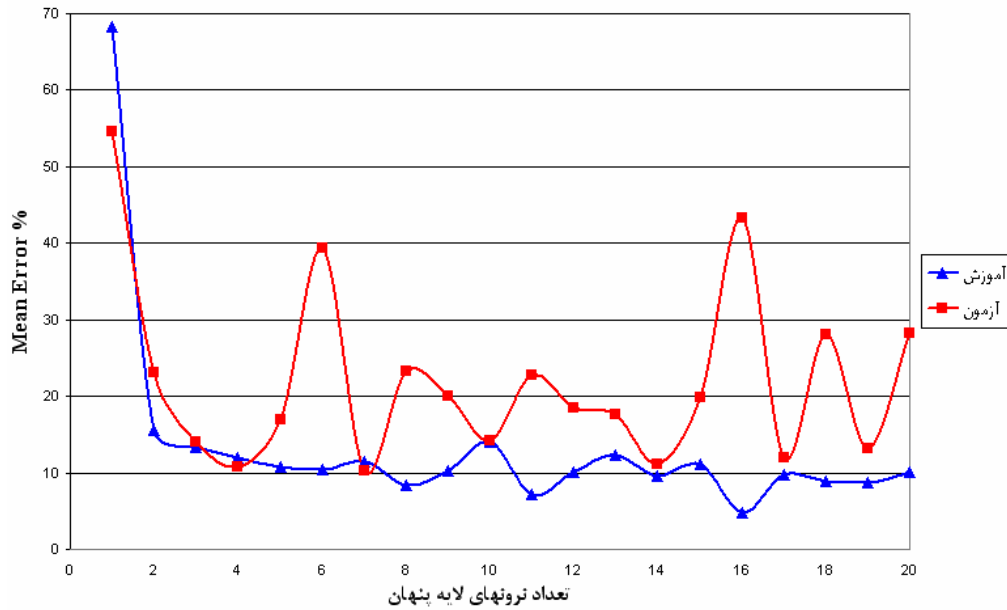
برای بیشترین عمق آبستگي s ، از مجموع ۱۸۲ داده، ۱۱۰ داده برای آموزش شبکه، ۳۶ داده برای آزمون و ۳۶ داده برای تست و مقایسه نتایج شبکه با نتایج روابط موجود انتخاب شده‌اند. نحوه انتخاب این داده‌ها به صورت تصادفی می‌باشد و فقط مقادیر حدی (بیشینه و کمینه) هر پارامتر در داده‌های آموزشی استفاده شده‌اند. این داده‌ها به ترتیب در جداول ۲ تا ۴ بخش ضمیمه موجود می‌باشند. قابل ذکر است که تحلیل شبکه‌های عصبی، با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB 7* انجام شده است.



شکل (۲-۵) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به ازای ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر s/z

در شکل (۲-۵) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به ازای ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر s/z رسم شده است. لازم به ذکر است که تعداد ۷ نرون در لایه پنهان، پس از سعی و خطا با تعداد نرون‌های مختلف، انتخاب شده است.

همین طور که در شکل (۲-۵) ملاحظه می‌شود، با ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید با ۱۰۰ چرخه آموزشی، مجموع خطای داده‌های آموزش و آزمون کمترین مقدار می‌باشد و با چرخه‌های بیش از ۱۰۰ چرخه، خطای داده‌های آزمون افزایش ناگهانی داشته و شبکه دچار ورآموزی می‌شود.



شکل (۳-۵) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۱۰۰ چرخه آموزشی با تابع سیگموئید برای متغیر S/Z

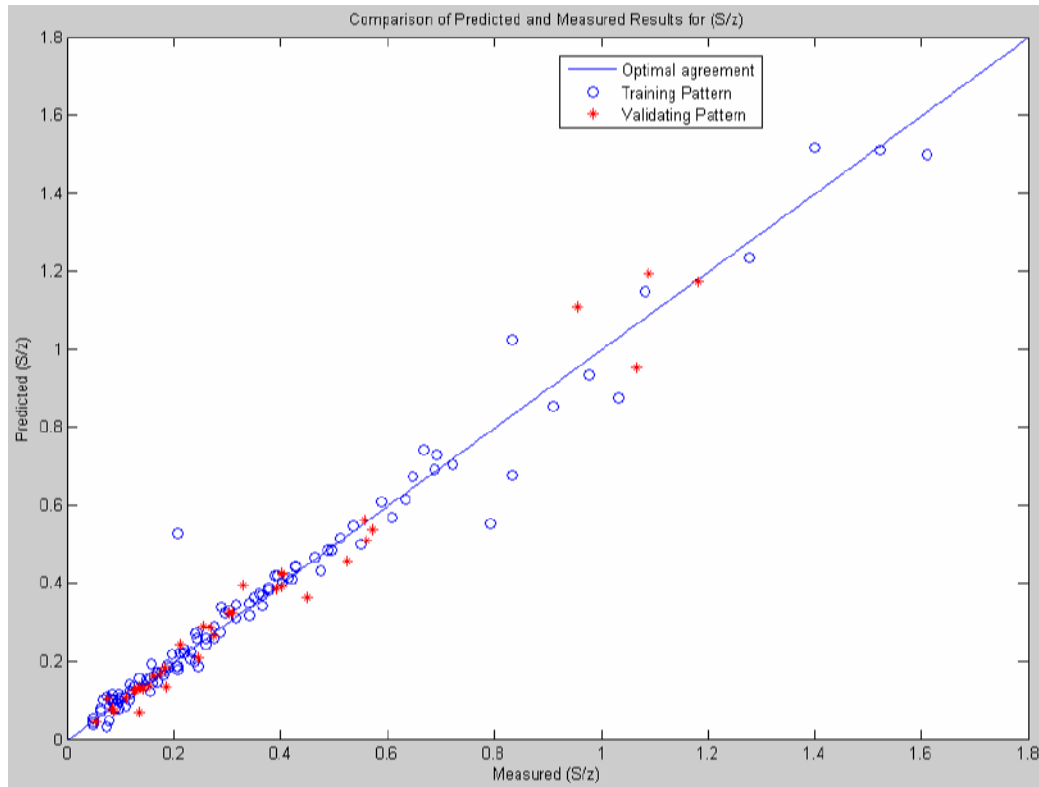
با توجه به شکل (۳-۵)، ملاحظه می‌شود که با ۱۰۰ چرخه آموزشی و با استفاده از تابع محرک سیگموئید با ۷ نرون در لایه پنهان، مجموع میانگین خطای داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون کمترین مقدار می‌باشد.

در جدول (۱-۵)، عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت، به ازای داده‌های آموزش و آزمون، مقایسه شده‌اند. محاسبات این شبکه‌ها در جداول ۵ و ۶ بخش ضمیمه موجود می‌باشد. همین طور که در جدول (۱-۵) ملاحظه می‌شود، با اینکه خطای داده‌های آموزشی تابع محرک تانژانت هیپربولیک کمتر از تابع سیگموئید می‌باشد، اما خطای داده‌های آزمون آن به مراتب بیشتر از خطای داده‌های آزمون تابع سیگموئید می‌باشد.

جدول (۱-۵) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر S/Z

		$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
تابع سیگموئید	آموزش ۱۱۰ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۱۱/۴۵	۲۰/۷
	آزمون ۳۶ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۱۰/۲	۱۴/۳۹
تابع خطی	آموزش ۱۱۰ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۶۰/۳۷	۸۸/۰۷
	آزمون ۳۶ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۴۹/۶۸	۷۵/۱۳
تابع تانژانت هیپربولیک	آموزش ۱۱۰ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۱۰/۴۲	۲۰/۱۳
	آزمون ۳۶ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۱۸/۱۳	۲۲/۸۹

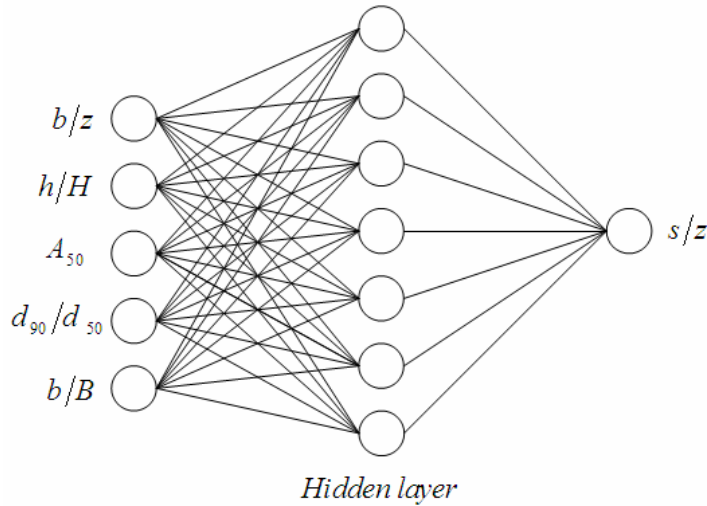
با توجه به جدول (۵-۱) و آزمون‌های متوالی و با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه پنهان و توابع محرک مختلف و تعداد چرخه‌های متفاوت نهایتاً تعداد ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و تعداد ۱۰۰ چرخه به عنوان بهترین حالت ممکن برای مدل شبکه عصبی برای متغیر s/z بدست آمد.



شکل (۴-۵) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر s/z برای شبکه عصبی با ۷ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون

در شکل (۴-۵) مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده متغیر s/z برای مدل شبکه عصبی با ۷ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون به صورت گرافیکی رسم شده‌اند. نزدیکی اکثر داده‌ها به خط وسط، نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر تولید شده به مقادیر واقعی می‌باشد.

در شکل (۵-۵) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر s/z رسم شده است. همین‌طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای $\frac{b}{B}$ ، $\frac{d_{90}}{d_{50}}$ ، A_{50} ، $\frac{h}{H}$ ، $\frac{b}{z}$ ، پارامترهای ورودی به شبکه هستند و پارامتر خروجی (s/z مطلوب) می‌باشد.

شکل (۵-۵) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر s/z

حال پس از انتخاب مدل شبکه عصبی، زمان مقایسه نتایج حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های تست (۳۶ داده) که شبکه هنوز آنها را ندیده است با نتایج حاصل از روابط موجود برای عمق آبستگي بیشینه s می‌باشد. همان طور که در فصل سوم نشان داده شد، سه رابطه مهم برای پیش‌بینی عمق آبستگي بیشینه s ، روابط زیر هستند:

رابطه میسون و آروماگم (۱۹۸۵):

$$\frac{s}{\left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}} = (6.42 - 3.10H^{0.1})g^{-H/600} \left(\frac{gH^3}{q^2}\right)^{20+H/600} \left(\frac{H}{d_s}\right)^{1/10} \left(\frac{h}{H}\right)^{3/20} \quad (3-3)$$

رابطه دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴):

$$\frac{s}{z} = 0.540 \left(\frac{b}{z}\right)^{0.593} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.751} \quad (32-3)$$

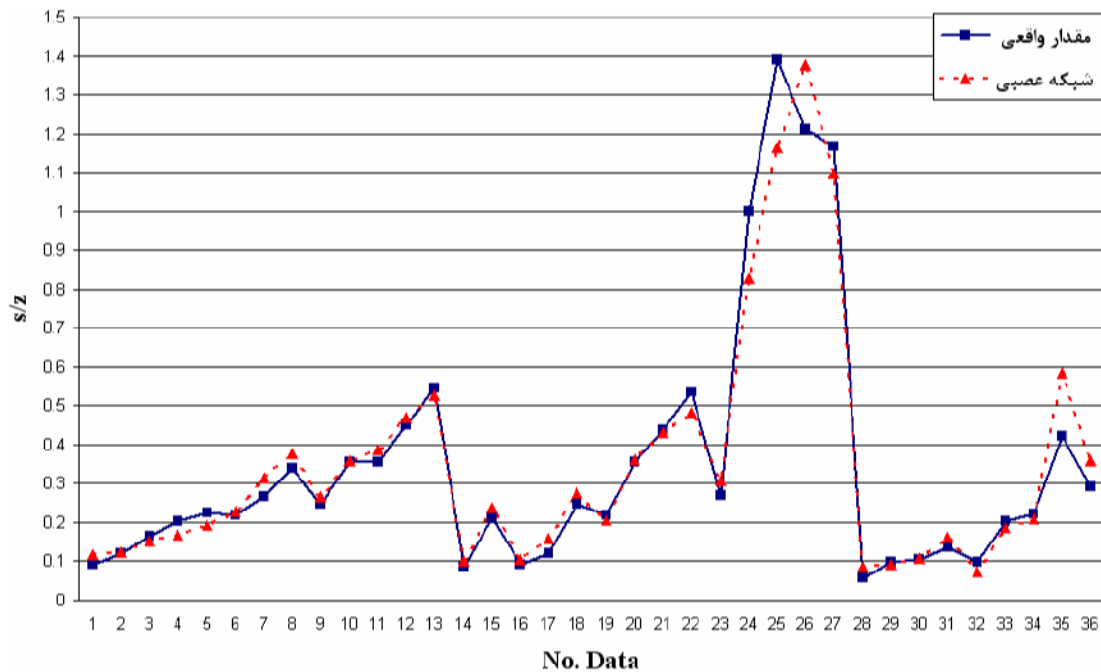
رابطه دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴):

$$s/z = 0.975 \left(\frac{h_0}{z}\right)^{0.863} \quad (33-3)$$

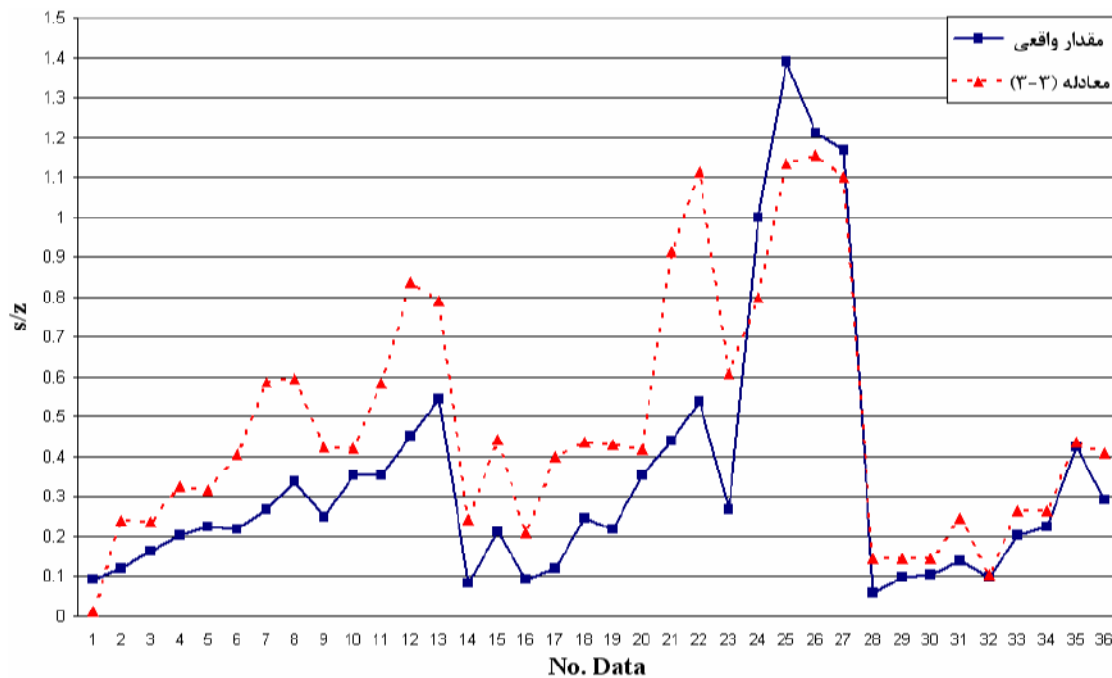
علت عدم استفاده از رابطه بورمن و ژولین (رابطه ۳-۱۸)، این است که این رابطه دارای عامل سرعت (U_0) می‌باشد، در صورتی که داده‌های بکار برده شده فاقد این عامل می‌باشند.

محاسبات مقادیر پیش‌بینی شده شبکه عصبی و مقادیر روابط (۳-۳) و (۳۲-۳) و (۳۳-۳) به ازای داده‌های تست و نیز مقدار خطاهای تولید شده با استفاده از هر روش در جدول ۷ بخش ضمیمه موجود می‌باشد.

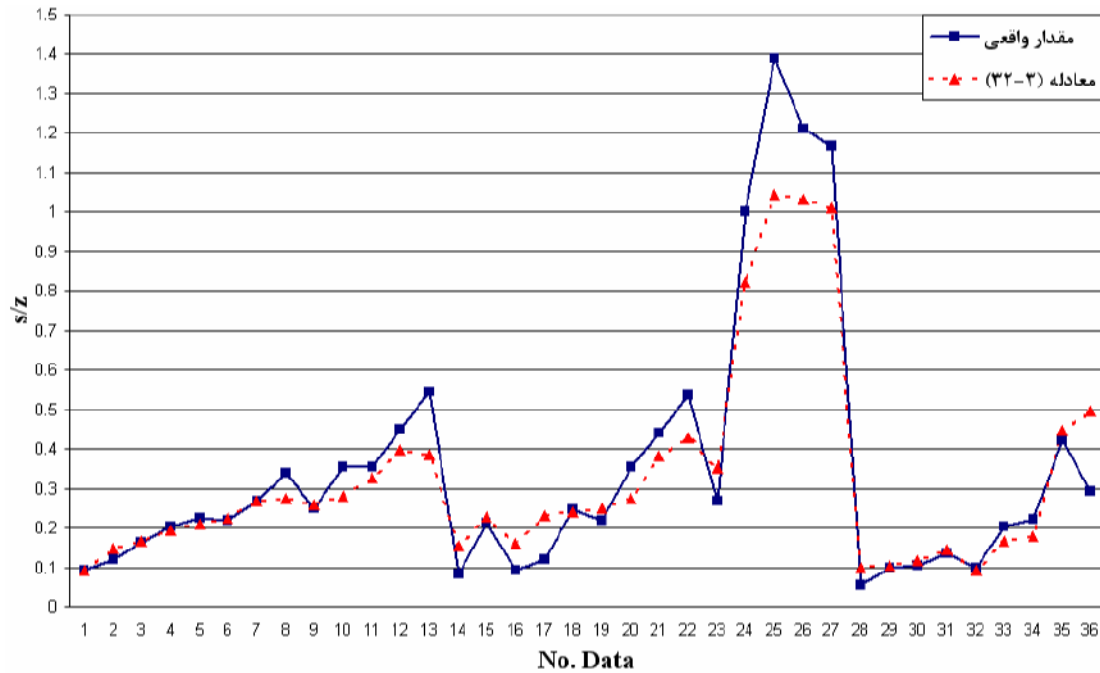
در نمودارهای زیر مقادير واقعي s/z در مقابل مقادير پيش‌بینی شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست نمایش داده شده‌اند.



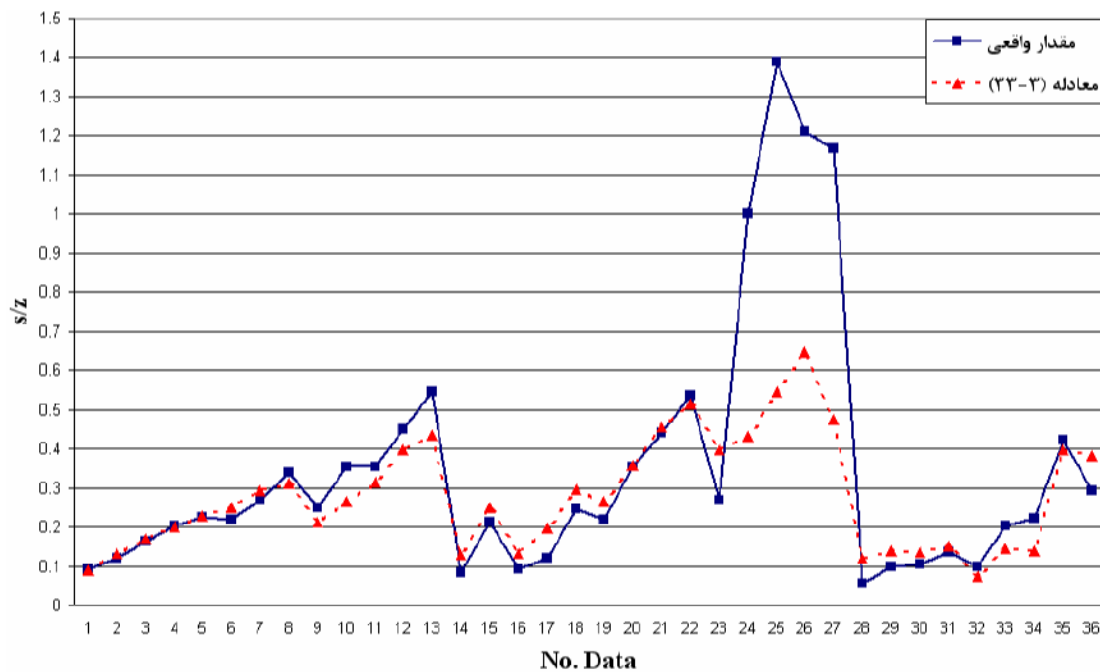
شکل (۵-۶) مقادير واقعي و مقادير پيش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغير s/z به ازای داده‌های تست



شکل (۵-۷) مقادير واقعي و مقادير توليد شده از معادله (۳-۳) برای متغير s/z به ازای داده‌های تست



شکل (۵-۸) مقادير واقعی و مقادير توليد شده از معادله (۳-۳۲) برای متغير s/z به ازای داده‌های تست

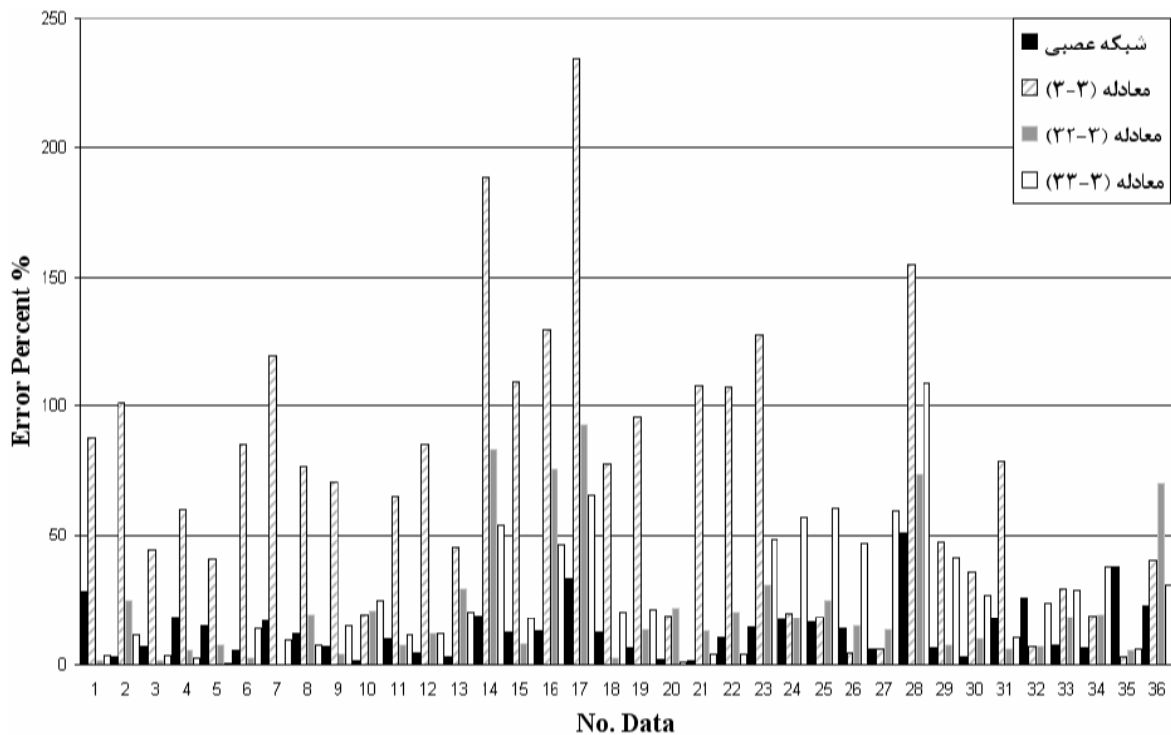


شکل (۵-۹) مقادير واقعی و مقادير توليد شده از معادله (۳-۳۳) برای متغير s/z به ازای داده‌های تست

همان طور که در شکل‌های (۵-۶)، (۵-۷)، (۵-۸) و (۵-۹) ملاحظه می‌شود، مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی نسبت به مقادير توليد شده از روابط (۳-۳)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) به مقادير واقعی نزدیکتر می‌باشند.

در شکل (۵-۱۰) درصد خطای بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و روابط (۳-۳)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) به ازای هر داده تست نمایش داده شده است.

در جدول (۵-۲) مقادیر درصد خطای ماکزیمم، درصد خطای میانگین و درصد انحراف معیار خطا بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و روابط (۳-۳)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) مقایسه شده‌اند.



شکل (۵-۱۰) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر s/z

جدول (۵-۲) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر s/z به ازای داده‌های تست

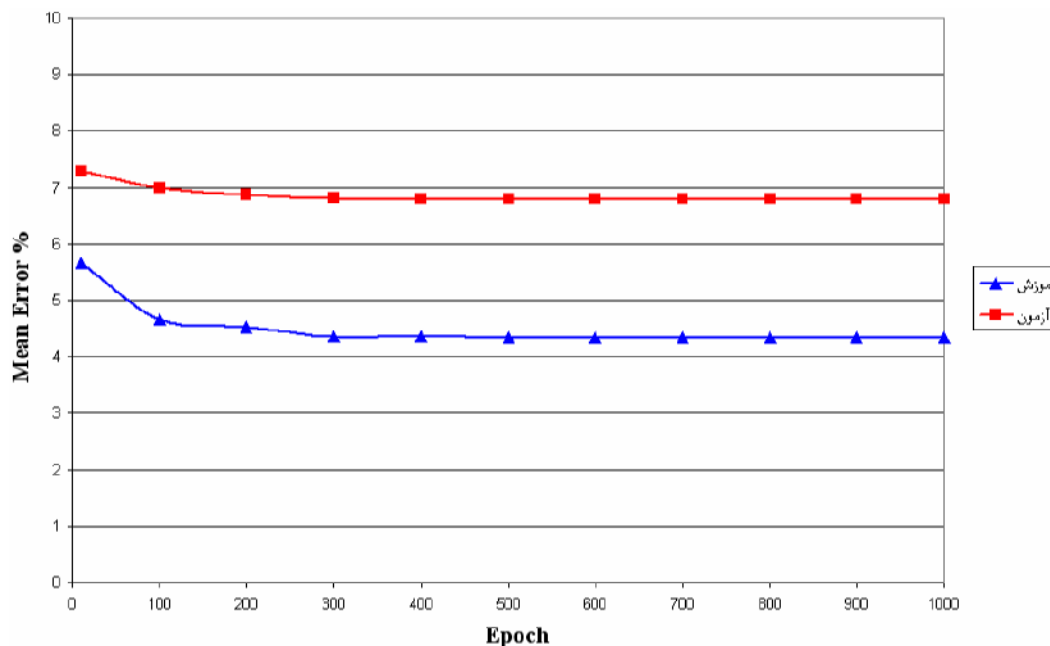
	$e_{max} \%$	$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
شبکه عصبی	۵۰/۹۳	۱۳/۵۱	۱۰/۹۷
رابطه (۳-۳)	۲۳۴/۱۲	۷۱/۰۶	۵۳/۶۲
رابطه (۳۲-۳)	۹۲/۹۴	۲۱/۸۰	۲۴/۸۳
رابطه (۳۳-۳)	۱۰۸/۷۷	۲۶/۵۵	۲۴/۱۰

همان طور که از شکل (۵-۱۰) و جدول (۵-۲) پیداست، نتایج حاصل از شبکه عصبی به مراتب از نتایج حاصل از روابط (۳-۳)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) بهتر می‌باشد.

۵-۴-۲- موقعیت عمق آبشستگی بیشینه XS

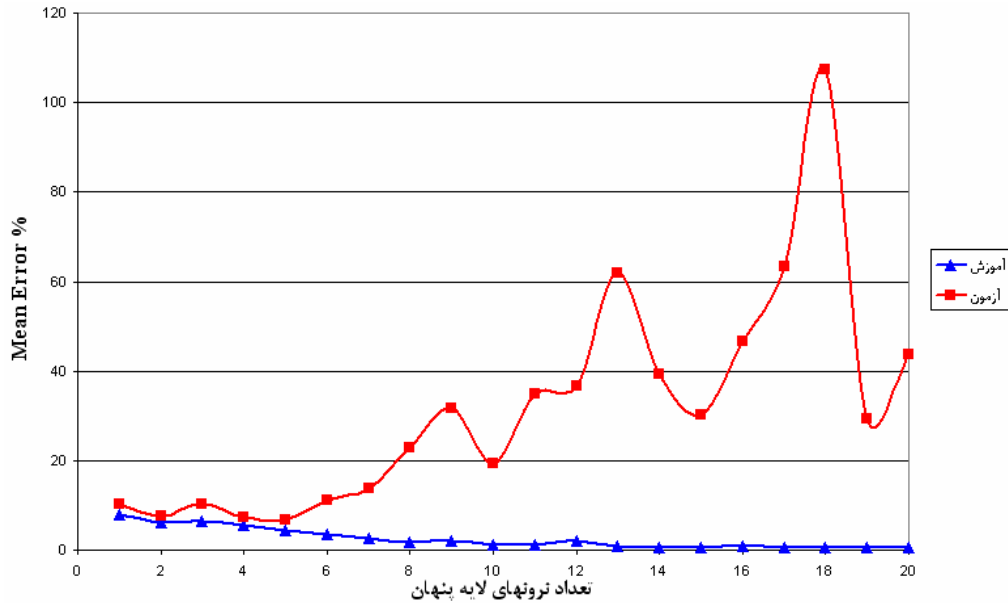
بمنظور پیش‌بینی موقعیت عمق آبشستگی بیشینه XS ، چهار پارامتر بی‌بعد شامل b/z ، h/H ، A_{90} و b/B به عنوان پارامترهای ورودی به شبکه استفاده می‌شوند و در لایهٔ خارجی نسبت بی‌بعد XS/z قرار داده می‌شود. در لایهٔ خارجی از یک نرون با تابع محرک خطی استفاده می‌شود. اما برای انتخاب تعداد و نوع تابع محرک نرون‌های لایهٔ پنهان و همچنین تعداد چرخه‌های آموزشی باید از آزمون و خطا استفاده کرد. فرآیند آزمون و خطا دقیقاً مثل فرآیند آزمون و خطا متغیر s/z انجام می‌شود. برای موقعیت عمق آبشستگی بیشینه XS ، از مجموع ۱۱۴ داده، ۶۸ داده برای آموزش شبکه، ۲۳ داده برای آزمون و ۲۳ داده برای تست و مقایسه نتایج شبکه با نتایج روابط موجود انتخاب شده‌اند. نحوهٔ انتخاب این داده‌ها به صورت تصادفی می‌باشد و فقط مقادیر حدی (بیشینه و کمینه) هر پارامتر در داده‌های آموزشی استفاده شده‌اند. این داده‌ها در جداول ۲ تا ۴ بخش ضمیمه موجود می‌باشند.

در شکل (۵-۱۱) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی ($Epoch$) به ازای ۵ نرون در لایهٔ پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XS/z رسم شده است. همین‌طور که ملاحظه می‌شود، با ۵ نرون در لایهٔ پنهان با تابع محرک سیگموئید با ۳۰۰ چرخهٔ آموزشی، مجموع خطای داده‌های آموزش و آزمون کمترین مقدار می‌باشد و با چرخه‌های بیش از ۳۰۰ چرخه، خطای داده‌های آموزش و آزمون ثابت می‌ماند.



شکل (۵-۱۱) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی ($Epoch$) به

ازای ۵ نرون در لایهٔ پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XS/z



شکل (۵-۱۲) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۳۰۰ چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XS/z

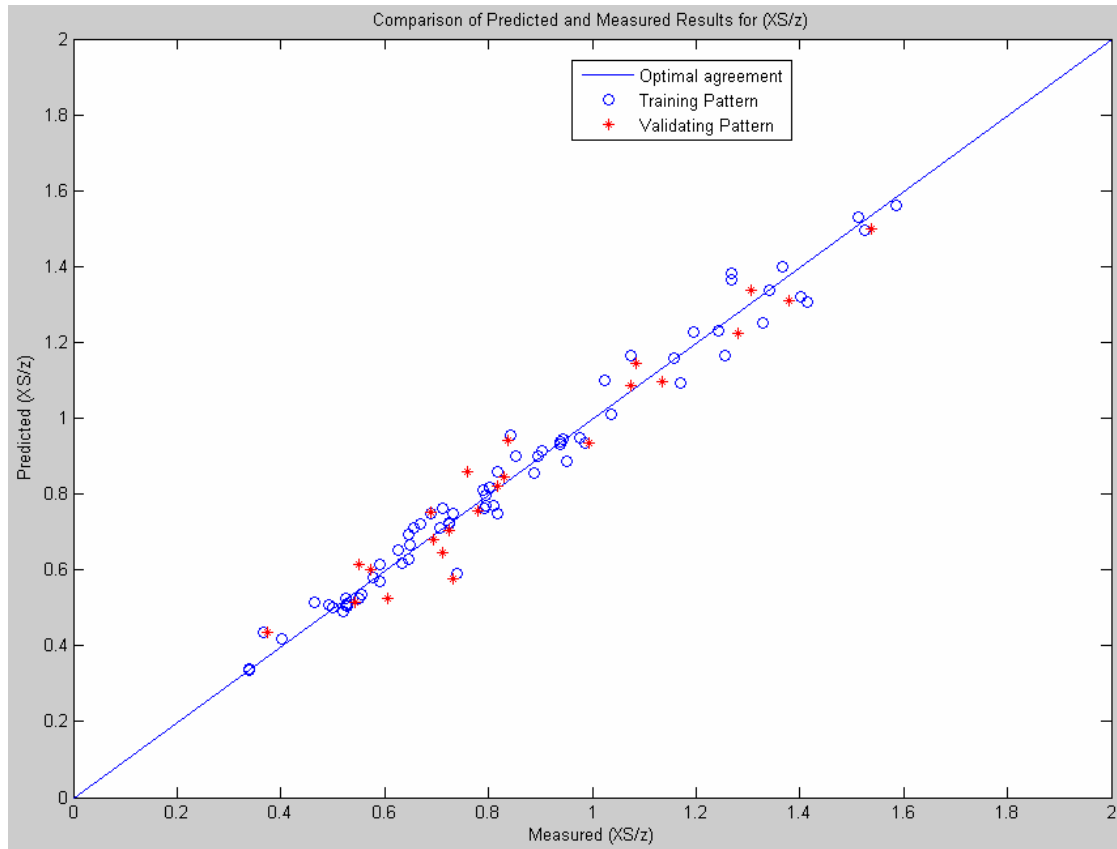
با توجه به شکل (۵-۱۲)، ملاحظه می‌شود که با ۳۰۰ چرخه آموزشی و با استفاده از تابع محرک سیگموئید با ۵ نرون در لایه پنهان، مجموع میانگین خطای داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون کمترین مقدار می‌باشد.

در جدول (۵-۳) عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت، به ازای داده‌های آموزش و آزمون مقایسه شده‌اند. محاسبات این شبکه‌ها در جداول ۸ و ۹ بخش ضمیمه موجود می‌باشد. همین طور که در جدول (۵-۳) ملاحظه می‌شود، خطای داده‌های آموزش و آزمون تابع محرک سیگموئید نسبت به خطای داده‌های آموزش و آزمون توابع محرک تانژانت هیپربولیک و خطی کمتر می‌باشد.

جدول (۵-۳) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XS/z

		$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
تابع سیگموئید	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۴/۳۷	۵/۹۷
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۶/۸۱	۸/۹۲
تابع خطی	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۷/۹۲	۱۰/۴۶
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۹/۷۳	۱۳/۷۲
تابع تانژانت هیپربولیک	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۴/۶۷	۶/۱۵
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۳۴/۲۵	۱۰۲/۰۸

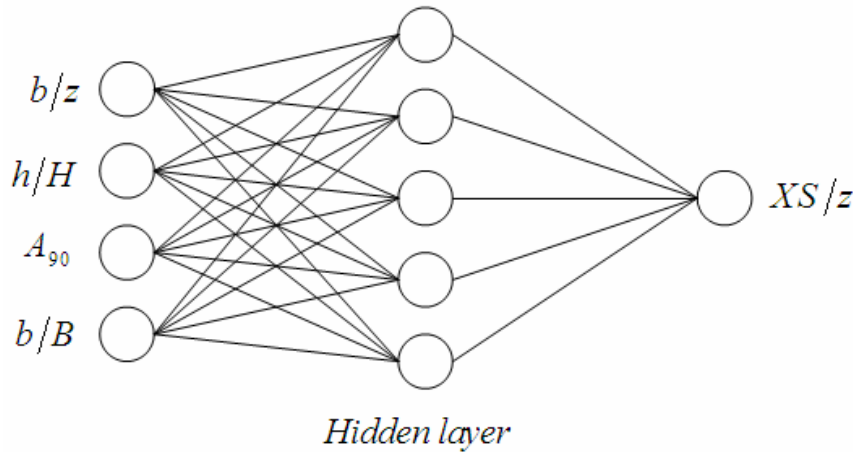
با توجه به جدول (۵-۳) و آزمون‌های متوالی و با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه پنهان و توابع محرک مختلف و تعداد چرخه‌های متفاوت نهایتاً تعداد ۵ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و تعداد ۳۰۰ چرخه به عنوان بهترین حالت ممکن برای مدل شبکه عصبی برای متغیر XS/z بدست آمد.



شکل (۵-۱۳) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر XS/z برای شبکه عصبی با ۵ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۳۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون

در شکل (۵-۱۳) مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده متغیر XS/z برای مدل شبکه عصبی با ۵ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۳۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون به صورت گرافیکی رسم شده‌اند. نزدیکی اکثر داده‌ها به خط وسط، نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر تولید شده به مقادیر واقعی می‌باشد.

در شکل (۵-۱۴) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر XS/z رسم شده است. همین طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای $\frac{b}{B}$, A_{90} , $\frac{h}{H}$, $\frac{b}{z}$ ، پارامترهای ورودی به شبکه هستند و پارامتر خروجی (خروجی مطلوب) XS/z می‌باشد.

شکل (۵-۱۴) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر XS/z

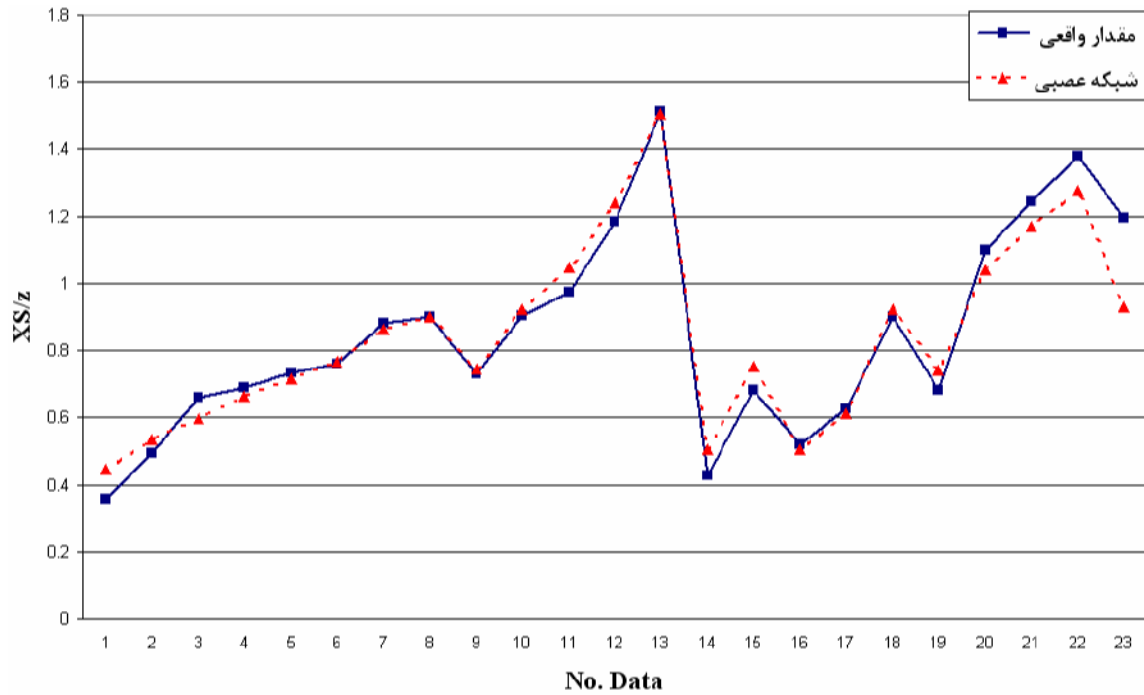
حال پس از انتخاب مدل شبکه عصبی، زمان مقایسه نتایج حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های تست (۲۳ داده) که شبکه هنوز آنها را ندیده است با نتایج حاصل از روابط موجود برای موقعیت عمق آبستنگی بیشینه XS می‌باشد. همان طور که در فصل سوم نشان داده شد، تنها رابطه موجود برای پیش‌بینی موقعیت عمق آبستنگی بیشینه XS ، رابطه زیر می‌باشد.

رابطه دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴):

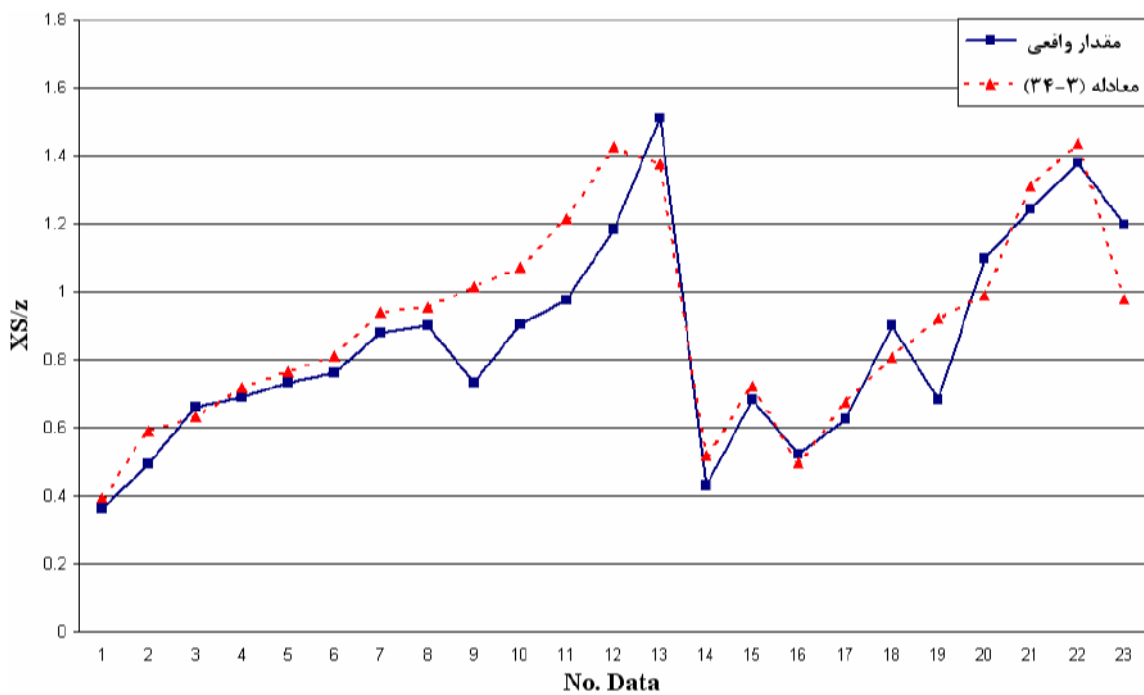
$$\frac{XS}{z} = 1.616 \left(\frac{b}{z} \right)^{0.662} \left(\frac{h}{H} \right)^{-0.117} A_{90}^{0.455} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.478} \quad (۳-۳۴)$$

محاسبات مقادیر پیش‌بینی شده شبکه عصبی و مقادیر رابطه (۳-۳۴) به ازای داده‌های تست و نیز مقدار خطاهای تولید شده با استفاده از هر روش در جدول ۱۰ بخش ضمیمه موجود می‌باشد.

در نمودارهای (۵-۱۵) و (۵-۱۶) مقادیر واقعی XS/z در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست نمایش داده شده‌اند.

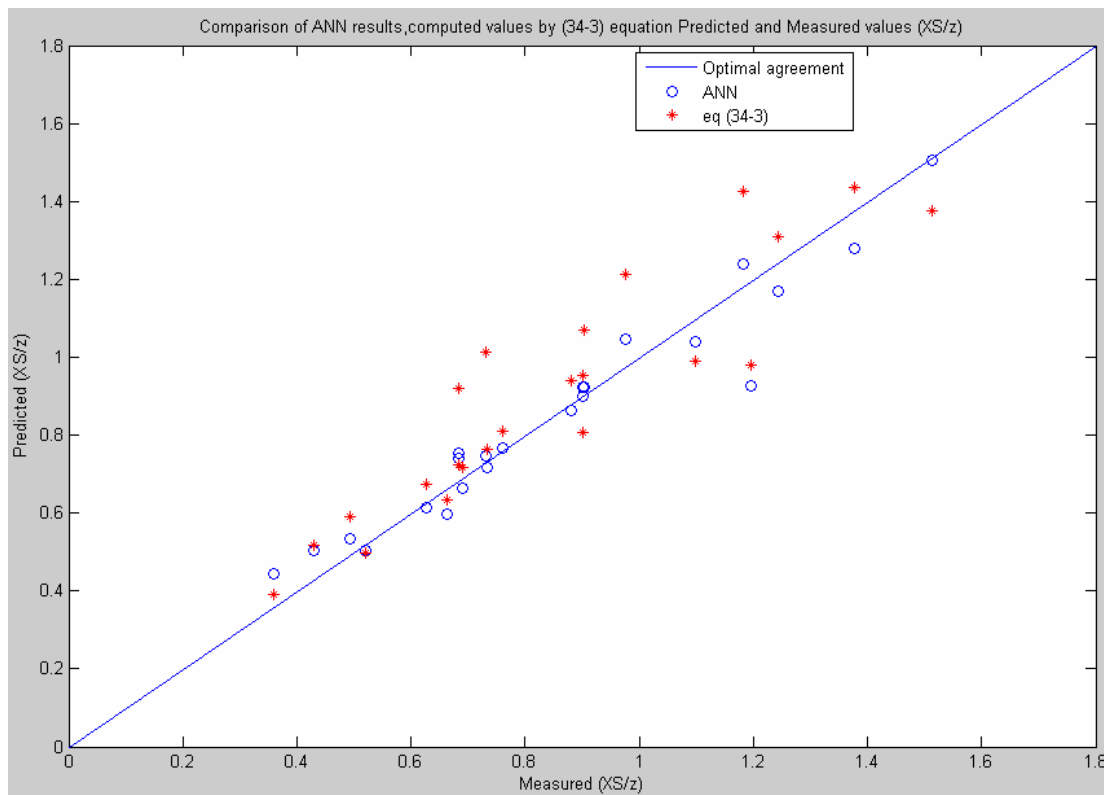


شکل (۵-۱۵) مقادير واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر XS/z به ازای داده‌های تست



شکل (۵-۱۶) مقادير واقعی و مقادير تولید شده از معادله (۳-۳۴) برای متغیر XS/z به ازای داده‌های تست

همان طور که در شکل‌های (۵-۱۵)، (۵-۱۶) ملاحظه می‌شود، مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی نسبت به مقادير تولید شده از رابطه (۳-۳۴) به مقادير واقعی نزدیکتر می‌باشند. در شکل (۵-۱۷) مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۴) در مقابل مقادير واقعی (اندازه‌گیری شده) به صورت گرافیکی رسم شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، مقادير شبکه عصبی که با دایره‌های توخالی نشان داده شده‌اند، به مقادير اندازه‌گیری شده نزدیکتر می‌باشند.

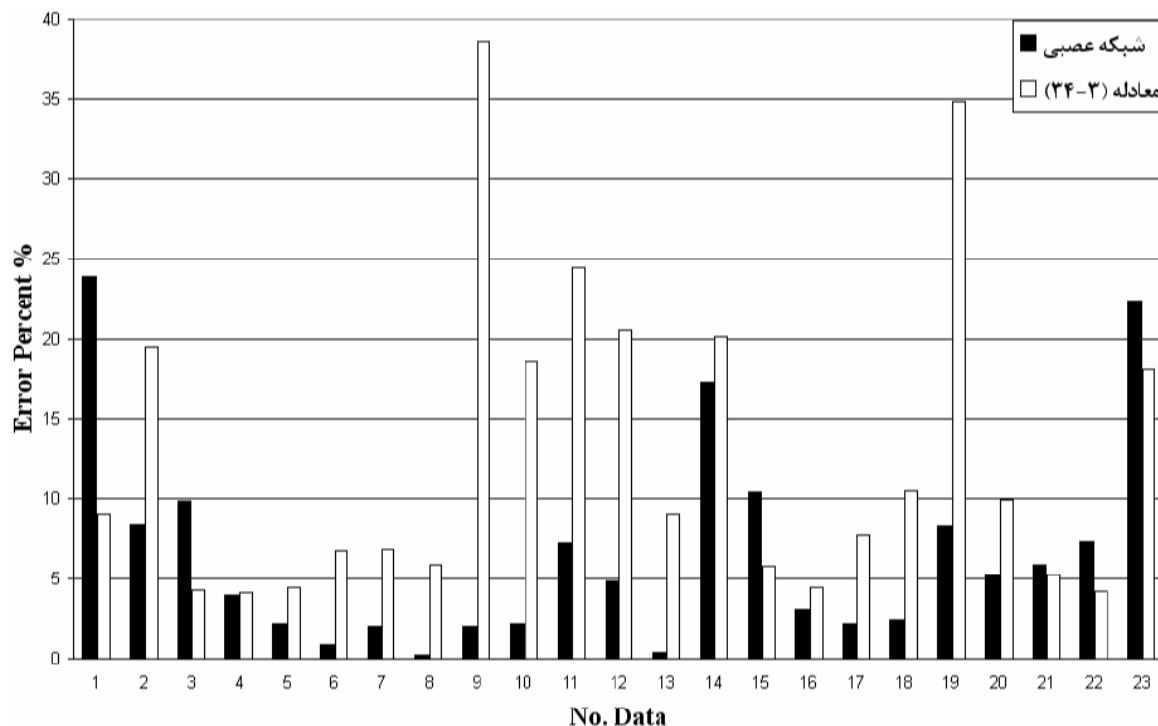


شکل (۵-۱۷) مقایسه نتایج شبکه عصبی و مقادير محاسبه شده از رابطه (۳-۳۴) با مقادير اندازه‌گیری شده برای

متغیر XS/z

در شکل (۵-۱۸) درصد خطای بین مقدار واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۴) به ازای داده‌های تست نمایش داده شده است.

در جدول (۵-۴) مقدار درصد خطای ماکزیمم، درصد خطای میانگین و درصد انحراف معیار خطا بین مقادير واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۴) مقایسه شده‌اند.



شکل (۵-۱۸) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر XS/z

جدول (۵-۴) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای XS/z به ازای داده‌های تست

	$e_{\max} \%$	$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
شبکه عصبی	۲۳/۹۰	۶/۶۳	۶/۵۷
رابطه (۳-۳۴)	۳۸/۵۹	۱۲/۷۴	۹/۹۲

همان طور که از شکل (۵-۱۸) و جدول (۵-۴) پیداست، نتایج حاصل از شبکه عصبی نسبت به

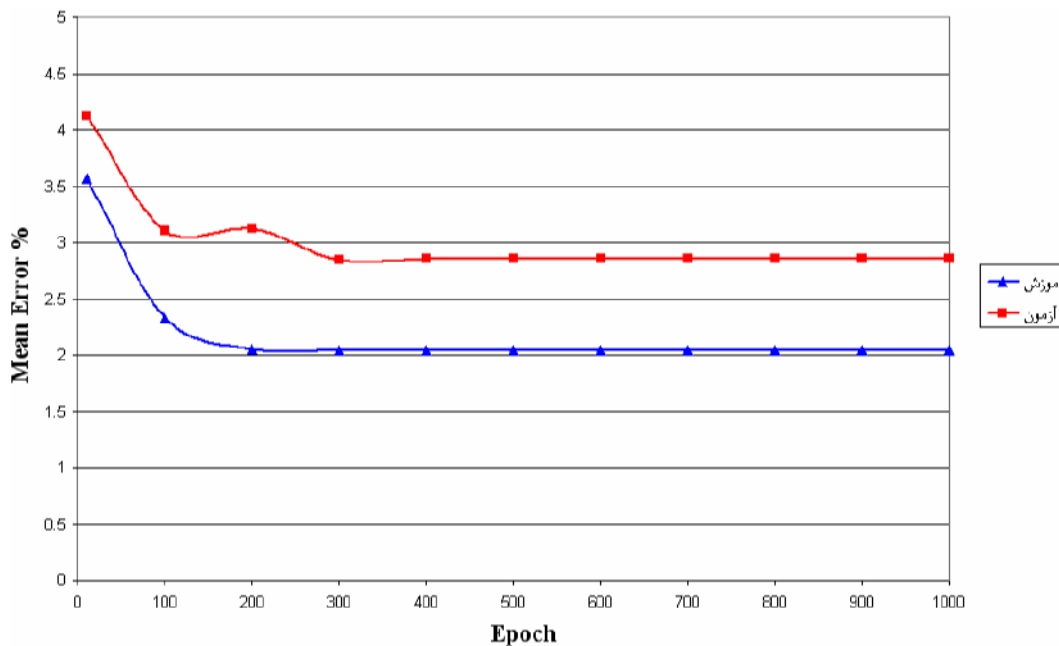
رابطه (۳-۳۴)، بهتر است.

۵-۴-۳- فاصله افقی بین تاج سرریز و تاج پشته ته‌نشین شده XD

بمنظور پیش‌بینی موقعیت پشته ته‌نشین شده XD ، پنج پارامتر بی‌بعد شامل A_{50} ، h/H ، b/z ، d_{90}/d_{50} و b/B به عنوان پارامترهای ورودی به شبکه استفاده می‌شوند و در لایه خارجی نسبت بی‌بعد XD/z قرار داده می‌شود. در لایه خارجی از یک نرون با تابع محرک خطی می‌شود. اما برای انتخاب تعداد و نوع تابع محرک نرون‌های لایه پنهان و همچنین تعداد چرخه‌های آموزشی باید از آزمون و خطا استفاده کرد. فرآیند آزمون و خطا دقیقاً مثل فرآیند آزمون و خطا متغیر s/z انجام می‌شود.

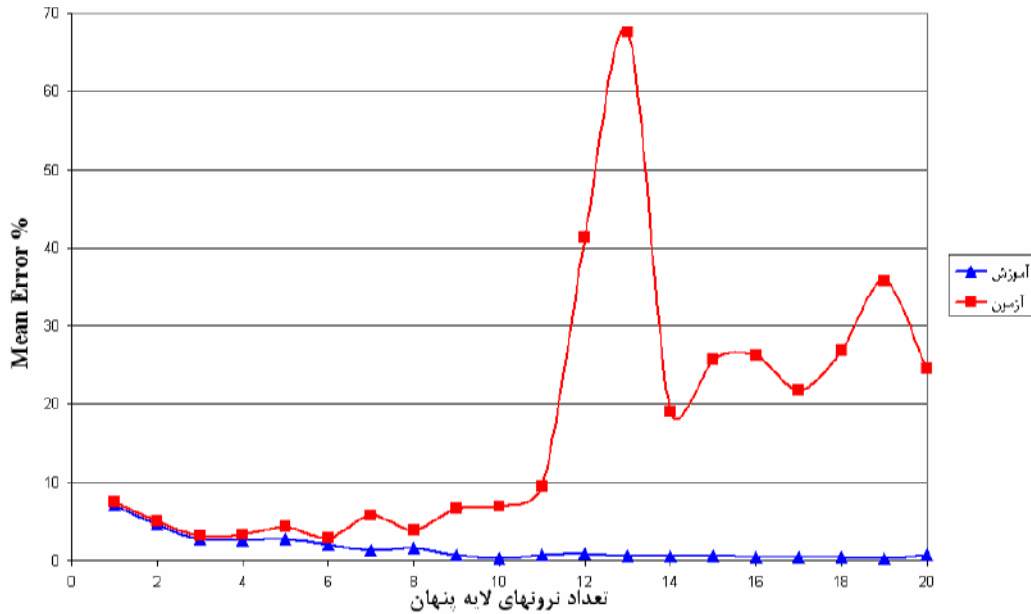
برای موقعیت پشته ته‌نشین شده XD ، از مجموع ۱۱۴ داده، ۶۸ داده برای آموزش شبکه، ۲۳ داده برای آزمون و ۲۳ داده برای تست و مقایسه نتایج شبکه با نتایج روابط موجود انتخاب شده‌اند. نحوه انتخاب این داده‌ها به صورت تصادفی می‌باشد و فقط مقادیر حدی (بیشینه و کمینه) هر پارامتر در داده‌های آموزشی استفاده شده‌اند. این داده‌ها در جداول ۲ تا ۴ بخش ضمیمه موجود می‌باشند.

در شکل (۵-۱۹) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی ($Epoch$) به ازای ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XD/z رسم شده است. همین‌طور که ملاحظه می‌شود، با ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید با ۳۰۰ چرخه آموزشی، مجموع خطای داده‌های آموزش و آزمون کمترین مقدار می‌باشد و با چرخه‌های بیش از ۳۰۰ چرخه، خطای داده‌های آموزش و آزمون ثابت می‌ماند.



شکل (۵-۱۹) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی ($Epoch$) به

ازای ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XD/z



شکل (۵-۲۰) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۳۰۰ چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر XD/z

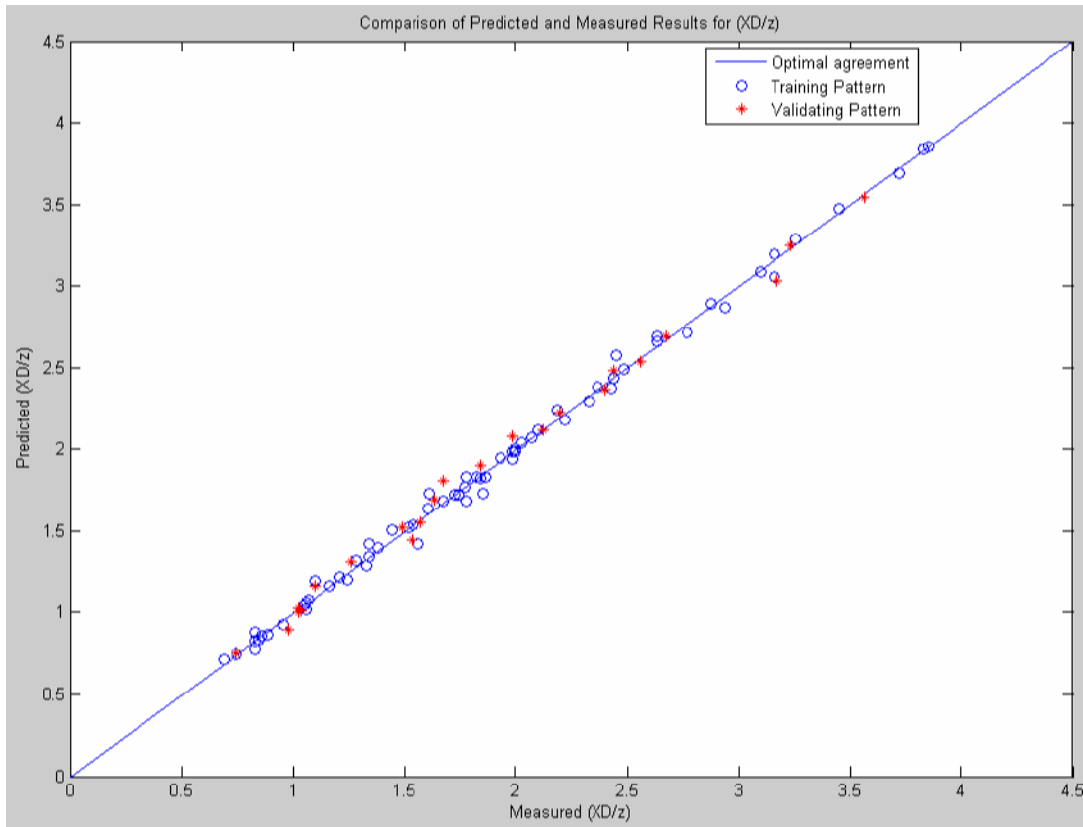
با توجه به شکل (۵-۲۰)، ملاحظه می‌شود که با ۳۰۰ چرخه آموزشی و با استفاده از تابع محرک سیگموئید با ۶ نرون در لایه پنهان، مجموع خطای داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون کمترین مقدار می‌باشد.

در جدول (۵-۵) عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت، به ازای داده‌های آموزش و آزمون مقایسه شده‌اند. محاسبات این شبکه‌ها در جداول ۱۱ و ۱۲ بخش ضمیمه موجود می‌باشد. همین‌طور که در جدول (۵-۵) ملاحظه می‌شود، با اینکه خطای داده‌های آموزشی تابع محرک تانژانت هیپربولیک کمتر از تابع سیگموئید می‌باشد، اما خطای داده‌های آزمون آن به مراتب بیشتر از خطای داده‌های آزمون تابع سیگموئید می‌باشد.

جدول (۵-۵) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XD/z

		$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
تابع سیگموئید	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۲/۰۴	۳/۰۳
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۲/۸۵	۳/۷۸
تابع خطی	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۷/۸۶	۱۱/۳۴
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۷/۰۹	۱۳/۷۶
تابع تانژانت هیپربولیک	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۱/۵۸	۲/۶
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۹/۸۴	۲۴/۸

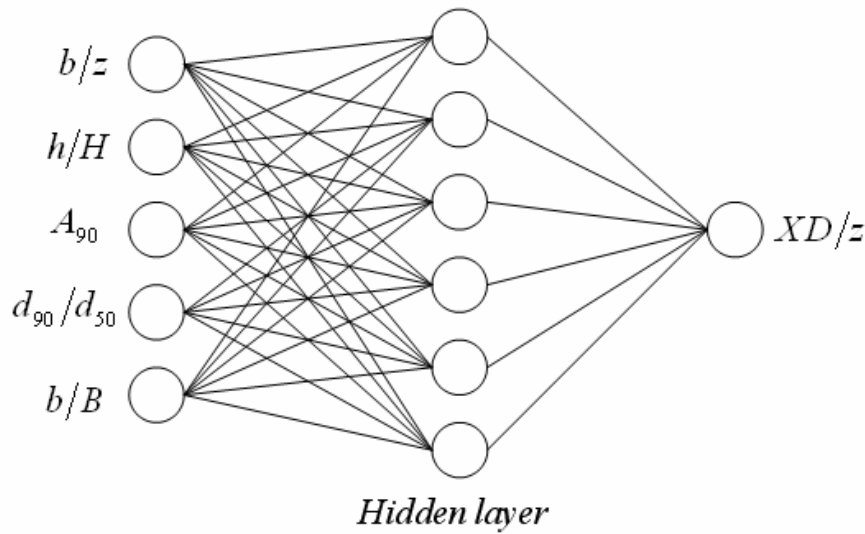
با توجه به جدول (۵-۵) و آزمون‌های متوالی و با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه پنهان و توابع محرک مختلف و تعداد چرخه‌های متفاوت نهایتاً تعداد ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و تعداد ۳۰۰ چرخه به عنوان بهترین حالت ممکن برای مدل شبکه عصبی برای متغیر XD/z بدست آمد.



شکل (۵-۲۱) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر XD/z برای شبکه عصبی با ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۳۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون

در شکل (۵-۴) مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده متغیر XD/z برای مدل شبکه عصبی با ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۳۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون به صورت گرافیکی رسم شده اند. نزدیکی اکثر داده‌ها به خط وسط، نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر تولید شده به مقادیر واقعی می‌باشد.

در شکل (۵-۲۲) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر XD/z رسم شده است. همین طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای $\frac{b}{B}$, $\frac{d_{90}}{d_{50}}$, A_{50} , $\frac{h}{H}$, $\frac{b}{z}$ ، پارامترهای ورودی به شبکه هستند و پارامتر خروجی (خروجی مطلوب) XD/z می‌باشد.

شکل (۵-۲۲) معماری مدل شبکه عصبی برای XD/z

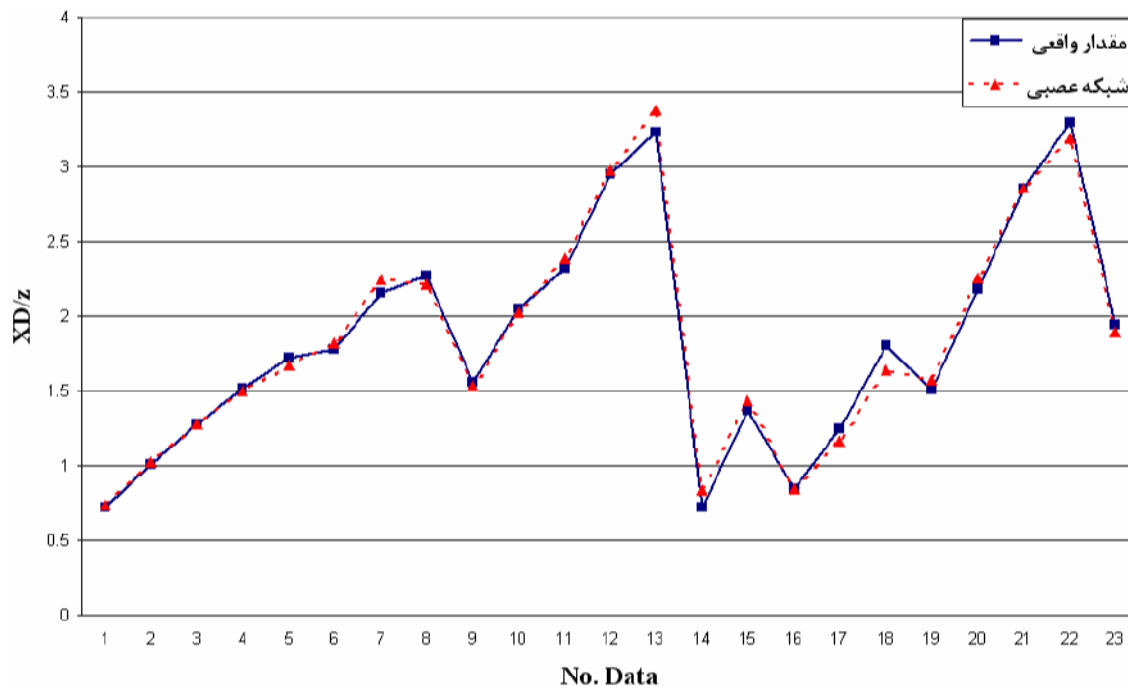
حال پس از انتخاب مدل شبکه عصبی، زمان مقایسه نتایج حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های تست (۲۳ داده) که شبکه هنوز آنها را ندیده است با نتایج حاصل از روابط موجود برای موقعیت پشته ته‌نشین شده XD می‌باشد. همان طور که در فصل سوم نشان داده شد، تنها رابطه موجود برای پیش‌بینی موقعیت پشته ته‌نشین شده XD ، رابطه زیر می‌باشد.

رابطه دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴):

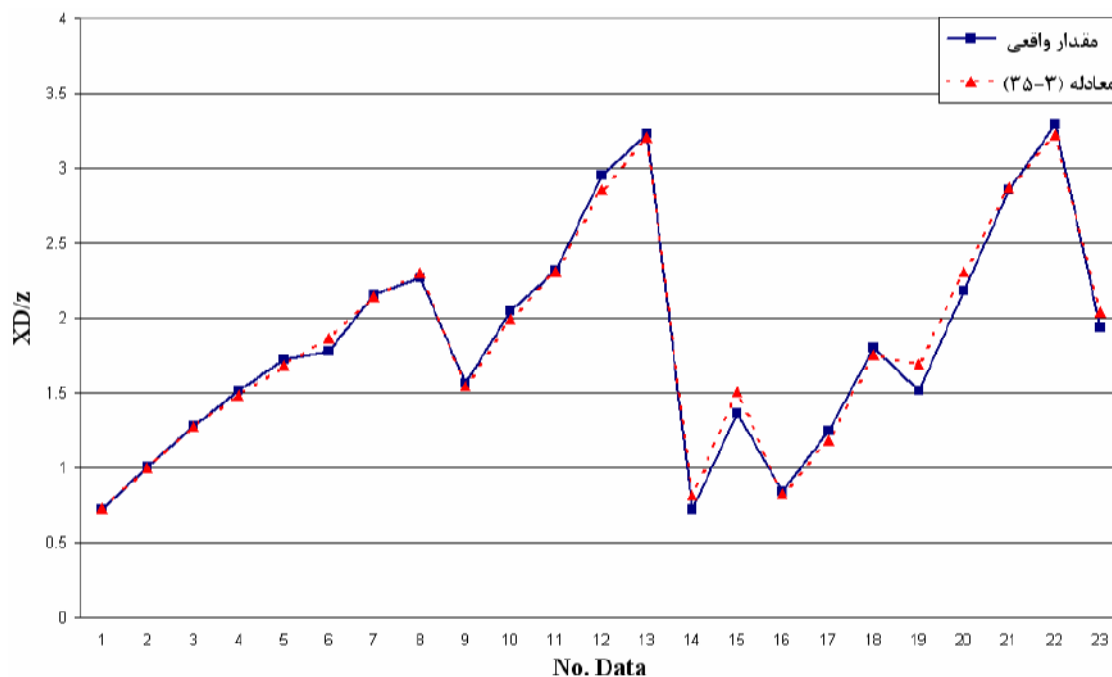
$$\frac{XD}{z} = 5.828 \left(\frac{b}{z}\right)^{0.241} \left(\frac{h}{H}\right)^{0.041} (A_{50})^{0.508} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-1.077} \left(\frac{b}{B}\right)^{0.057} \quad (3-35)$$

محاسبات مقادیر پیش‌بینی شده شبکه عصبی و مقادیر رابطه (۳-۳۵) به ازای داده‌های تست و نیز مقدار خطاهای تولید شده با استفاده از هر روش در جدول ۱۳ بخش ضمیمه موجود می‌باشد.

در نمودارهای (۵-۲۳) و (۵-۲۴) مقادیر واقعی XD/z در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست نمایش داده شده‌اند.

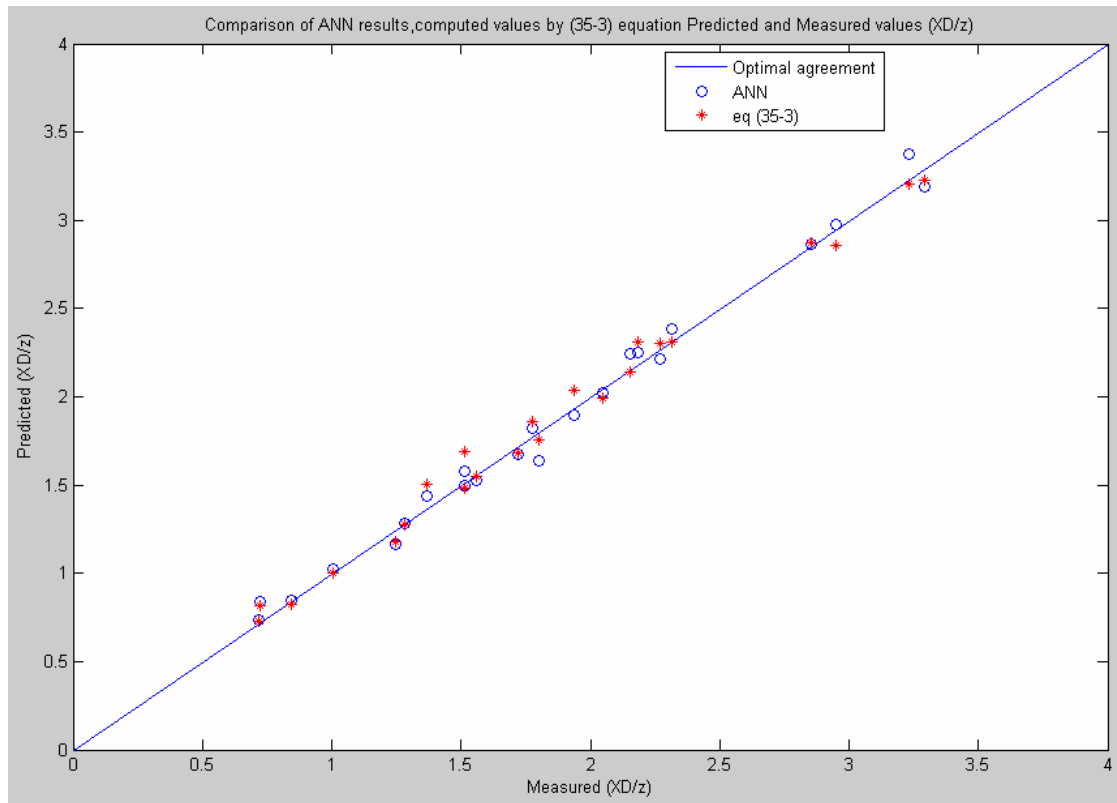


شکل (۲۳-۵) مقادير واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر XD/z به ازای داده‌های تست



شکل (۲۴-۵) مقادير واقعی و مقادير تولید شده از معادله (۳-۳۵) برای متغیر XD/z به ازای داده‌های تست

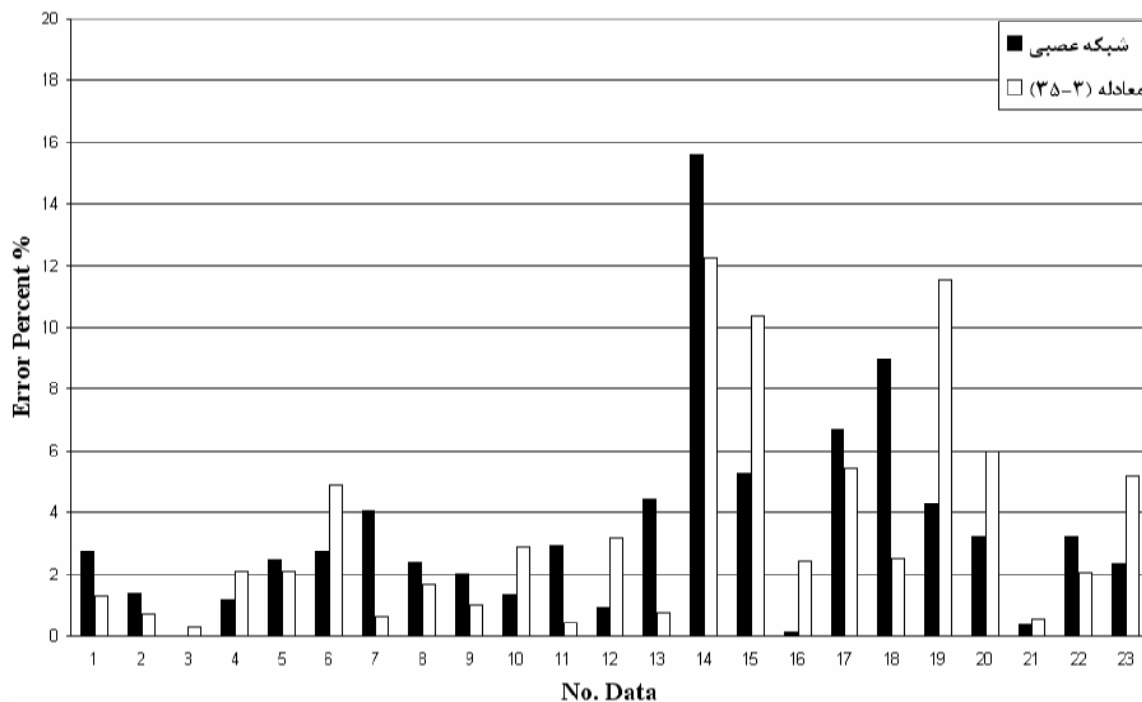
در شکل (۲۵-۵) مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۵) در مقابل مقادير واقعی (اندازه‌گیری شده) به صورت گرافیکی رسم شده است.



شکل (۲۵-۵) مقایسه نتایج شبکه عصبی و مقادير محاسبه شده از رابطه (۳-۳۵) با مقادير اندازه‌گیری شده برای متغیر XD/z

در شکل (۲۶-۵) درصد خطای بین مقدار واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۵) به ازای داده‌های تست نمایش داده شده است.

در جدول (۶-۵) مقدار درصد خطای ماکزیمم، درصد خطای میانگین و درصد انحراف معیار خطا بین مقادير واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۵) مقایسه شده‌اند.



شکل (۲۶-۵) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر XD/z

جدول (۶-۵) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر XD/z به ازای داده‌های تست

	$e_{\max} \%$	$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
شبکه عصبی	۱۵/۶۱	۳/۴۲	۳/۴
رابطه (۳-۳۴)	۱۲/۲۶	۳/۴۹	۳/۵۶

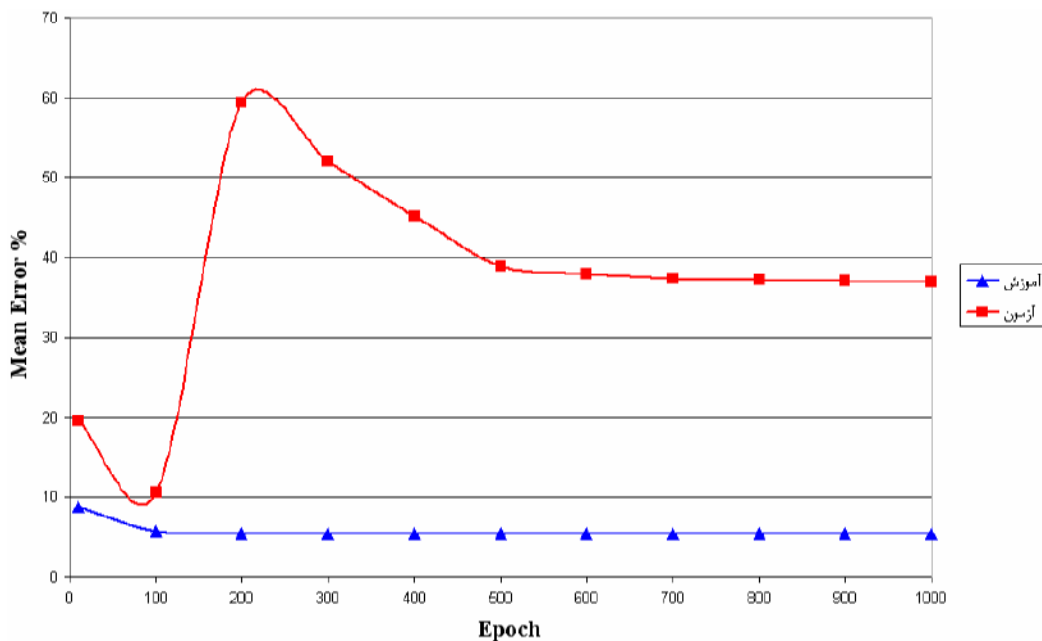
همین طور که از شکل (۲۶-۵) و جدول (۶-۵) پیداست، نتایج شبکه عصبی به نتایج رابطه (۳-۳۵)

خیلی نزدیک می‌باشد، ولی باز هم نتایج شبکه عصبی بهتر می‌باشد.

۵-۴-۴- ارتفاع پشتة ته‌نشین شده h_d

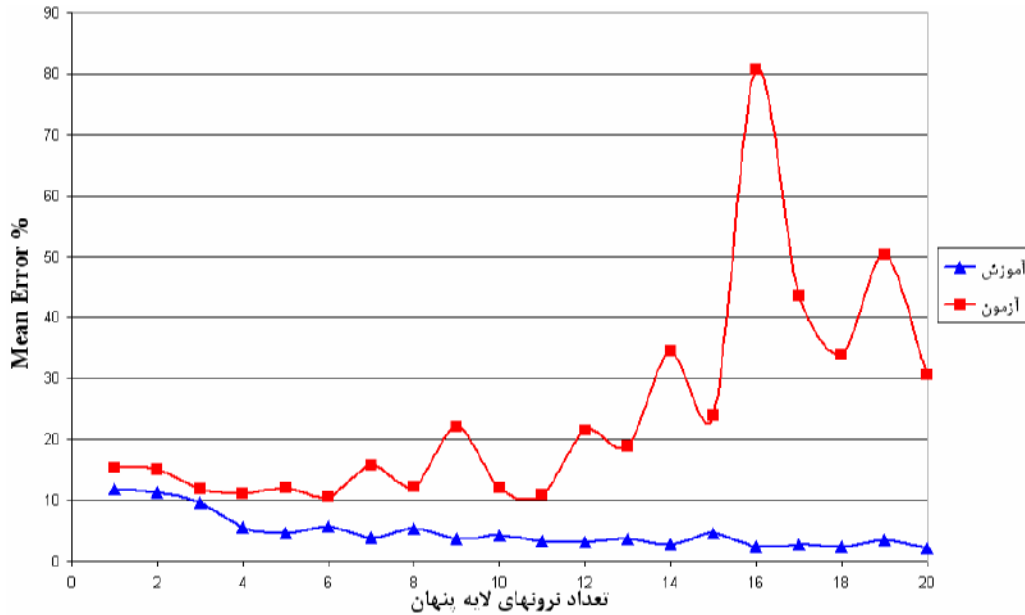
بمنظور پیش‌بینی ارتفاع پشتة ته‌نشین شده h_d ، چهار پارامتر بی‌بعد شامل، h/H ، A_{90} ، d_{90}/d_{50} و b/B به عنوان پارامترهای ورودی استفاده می‌شوند و در لایة خارجی نسبت بی‌بعد h_d/z قرار داده می‌شود. در لایة خارجی از یک نرون با تابع محرک خطی استفاده می‌شود. اما برای انتخاب تعداد و نوع تابع محرک نرون‌های لایة پنهان و همچنین تعداد چرخه‌های آموزشی باید از فرآیند آزمون و خطا استفاده کرد. فرآیند آزمون و خطا دقیقاً مثل فرآیند آزمون و خطا متغیر s/z انجام می‌شود. برای ارتفاع پشتة ته‌نشین شده h_d ، از مجموع ۱۱۴ داده، ۶۸ داده برای آموزش شبکه، ۲۳ داده برای آزمون و ۲۳ داده برای تست و مقایسه نتایج شبکه با نتایج روابط موجود انتخاب شده‌اند. نحوه انتخاب این داده‌ها به صورت تصادفی می‌باشد و فقط مقادیر حدی (بیشینه و کمینه) هر پارامتر در داده‌های آموزشی استفاده شده‌اند. این داده‌ها در جداول ۲ تا ۴ بخش ضمیمه موجود می‌باشند.

در شکل (۵-۲۷) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به ازای ۶ نرون در لایة پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر h_d/z رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با ۶ نرون در لایة پنهان با تابع محرک سیگموئید و با ۱۰۰ چرخة آموزشی، مجموع خطای داده‌های آموزش و آزمون کمترین مقدار می‌باشد و با چرخه‌های بیش از ۱۰۰ چرخه، خطای داده‌های آزمون افزایش ناگهانی داشته و سپس ثابت می‌شود.



شکل (۵-۲۷) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد چرخه‌های آموزشی (*Epoch*) به

ازای ۶ نرون در لایة پنهان با تابع محرک سیگموئید برای متغیر h_d/z



شکل (۵-۲۸) منحنی تغییرات میانگین خطای داده‌های آموزش و آزمون برحسب تعداد نرون‌های لایه پنهان برای ۱۰۰ تکرار چرخه آموزشی با تابع محرک سیگموئید برای متغیر h_d/z

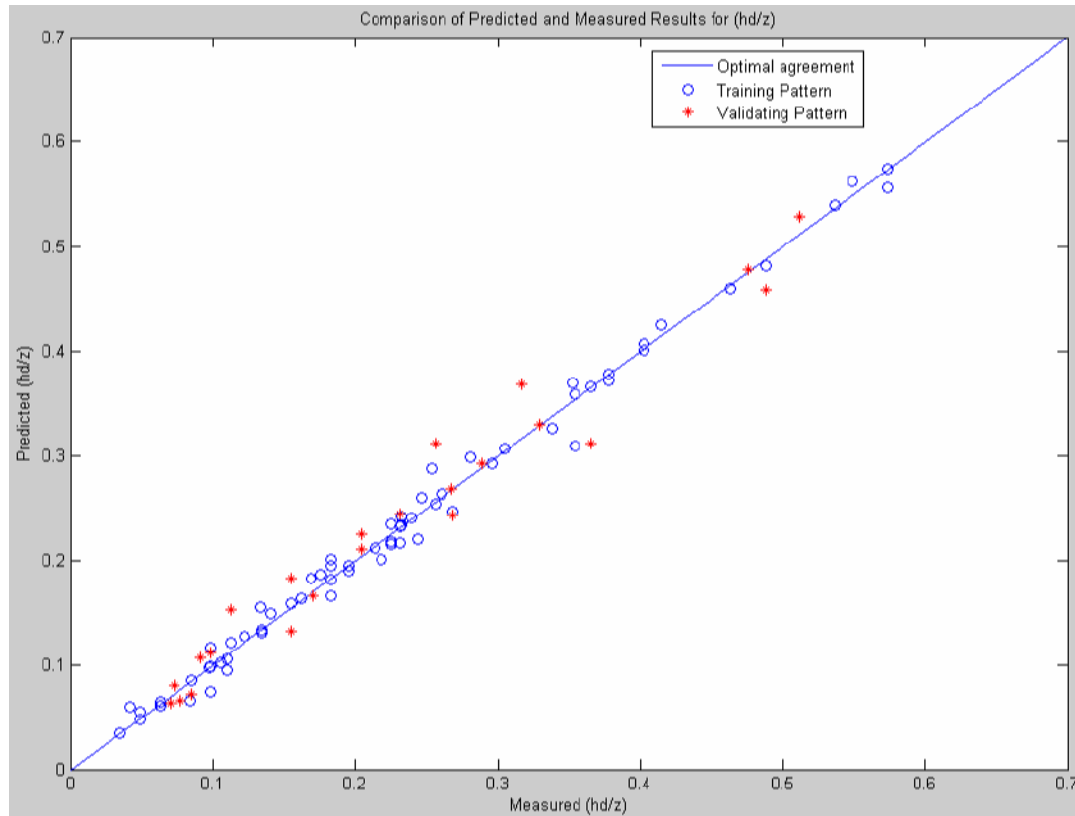
با توجه به شکل (۵-۲۸)، ملاحظه می‌شود که با ۱۰۰ چرخه آموزشی و با استفاده از تابع محرک سیگموئید با ۶ نرون در لایه پنهان، مجموع خطای داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون کمترین مقدار می‌باشد.

در جدول (۵-۷)، عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت، به ازای داده‌های آموزش و آزمون، مقایسه شده‌اند. محاسبات این شبکه‌ها در جداول ۱۴ و ۱۵ بخش ضمیمه موجود می‌باشد. همین‌طور که در جدول (۵-۷) ملاحظه می‌شود، با اینکه خطای داده‌های آموزشی تابع محرک تانژانت هیپربولیک کمتر از تابع سیگموئید می‌باشد، اما خطای داده‌های آزمون آن به مراتب بیشتر از خطای داده‌های آزمون تابع سیگموئید می‌باشد.

جدول (۵-۷) مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر h_d/z

		$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
تابع سیگموئید	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۵/۶۹	۹/۷۹
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۱۰/۶	۱۳/۴۵
تابع خطی	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۱۳/۵۲	۲۲/۳۷
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۱۷/۱۳	۲۵/۱۹
تابع تانژانت هیپربولیک	آموزش ۶۸ داده (حدود ۶۰٪ داده‌ها)	۴/۲۵	۶/۳
	آزمون ۲۳ داده (حدود ۲۰٪ داده‌ها)	۲۰/۷۸	۳۹/۲۷

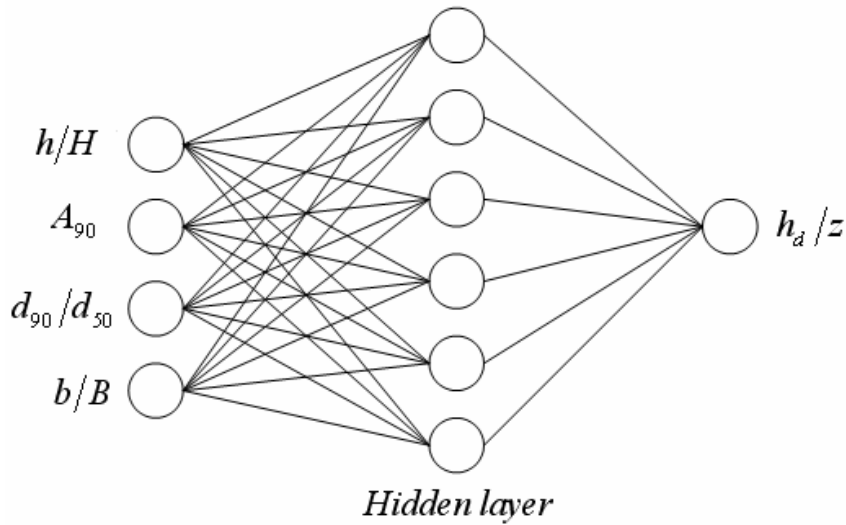
با توجه به جدول (۵-۷) و آزمون‌های متوالی و با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه پنهان و توابع محرک مختلف و تعداد چرخه‌های متفاوت نهایتاً تعداد ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و تعداد ۱۰۰ چرخه به عنوان بهترین حالت ممکن برای مدل شبکه عصبی برای متغیر h_d/z بدست آمد.



شکل (۵-۲۹) مقایسه مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده متغیر h_d/z برای شبکه عصبی با ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون

در شکل (۵-۲۹) مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده متغیر h_d/z برای مدل شبکه عصبی با ۶ نرون لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱۰۰ چرخه آموزشی به ازای داده‌های آموزش و آزمون به صورت گرافیکی رسم شده اند. نزدیکی اکثر داده‌ها به خط وسط، نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر تولید شده به مقادیر واقعی می‌باشد.

در شکل (۵-۳۰) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر h_d/z رسم شده است. همین طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای $\frac{b}{B}$, $\frac{d_{90}}{d_{50}}$, A_{90} , $\frac{h}{H}$ ، پارامترهای ورودی به شبکه هستند و پارامتر خروجی (خروجی مطلوب) h_d/z می‌باشد.



شکل (۵-۳۰) معماری مدل شبکه عصبی برای متغیر h_d/z

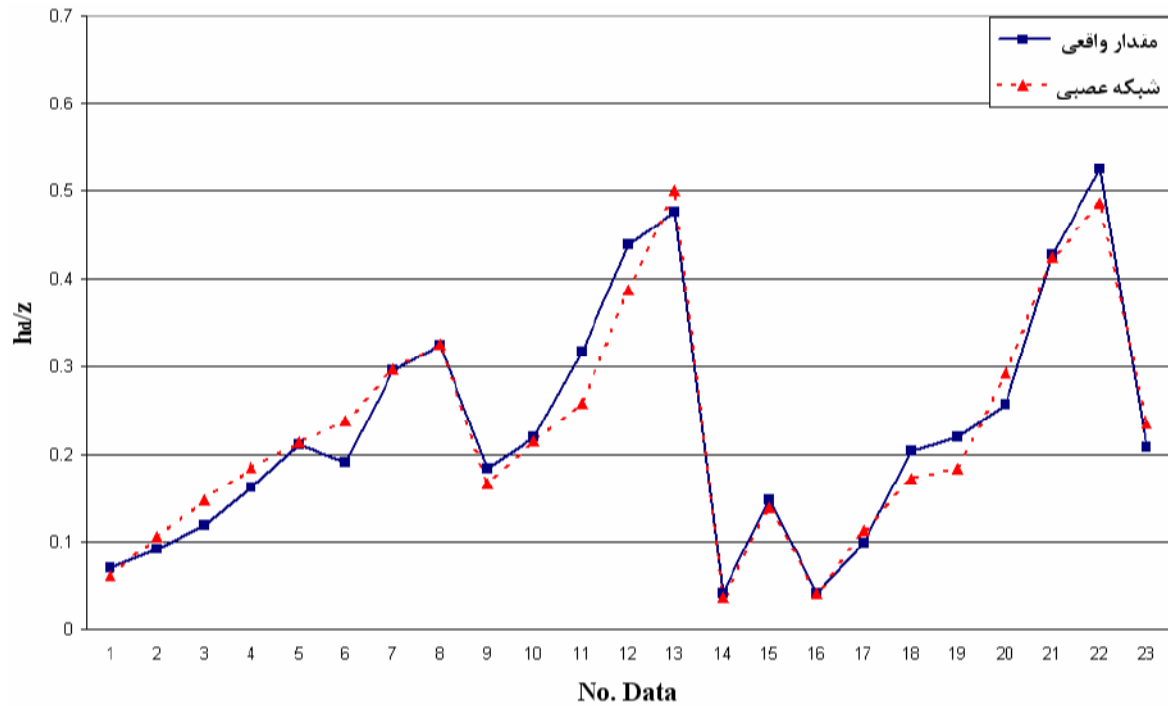
حال پس از انتخاب مدل شبکه عصبی، زمان مقایسه نتایج حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های تست (۲۳ داده) که شبکه هنوز آنها را ندیده است با نتایج حاصل از روابط موجود برای ارتفاع پشته ته‌نشین شده h_d می‌باشد. همان طور که در فصل سوم نشان داده شد، تنها رابطه موجود برای پیش‌بینی ارتفاع پشته ته‌نشین شده h_d ، رابطه زیر می‌باشد.

رابطه دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴):

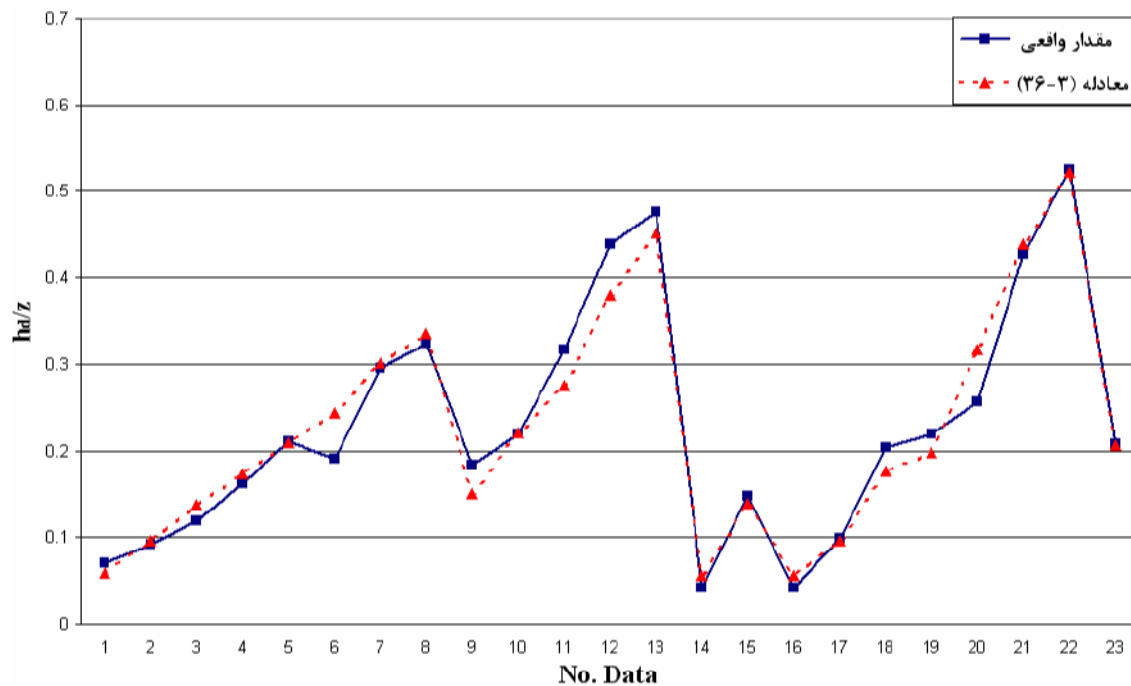
$$\frac{h_D}{z} = 2.780 \left(\frac{h}{H} \right)^{0.061} (A_{90})^{0.764} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{-2.489} \left(\frac{b}{B} \right)^{0.794} \quad (۳-۳۶)$$

محاسبات مقادیر پیش‌بینی شده شبکه عصبی و مقادیر رابطه (۳-۳۶) به ازای داده‌های تست و نیز مقدار خطاهای تولید شده با استفاده از هر روش در جدول ۱۶ بخش ضمیمه موجود می‌باشد.

در نمودارهای (۵-۳۱) و (۵-۳۲) مقادیر واقعی h_d/z در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست نمایش داده شده‌اند.

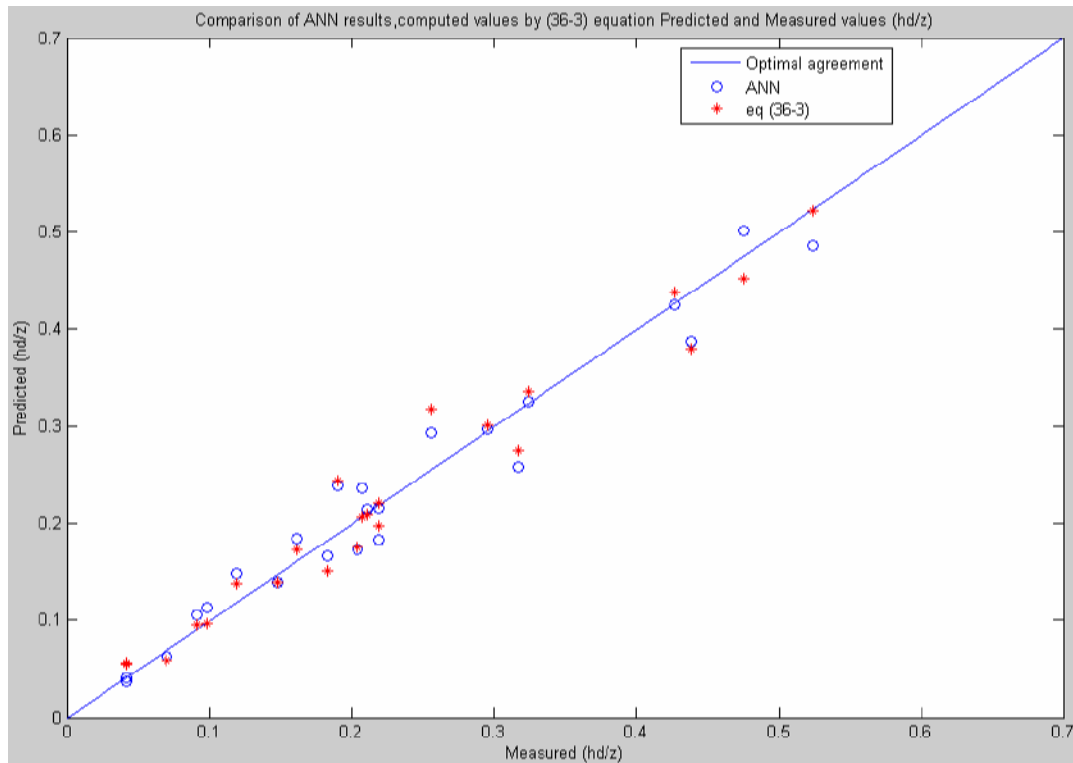


شکل (۳۱-۵) مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های تست



شکل (۳۲-۵) مقادیر واقعی و مقادیر تولید شده از معادله (۳-۳۶) برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های تست

در شکل (۳۳-۵) مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۶) در مقابل مقادير واقعی (اندازه‌گیری شده) به صورت گرافیکی رسم شده است.

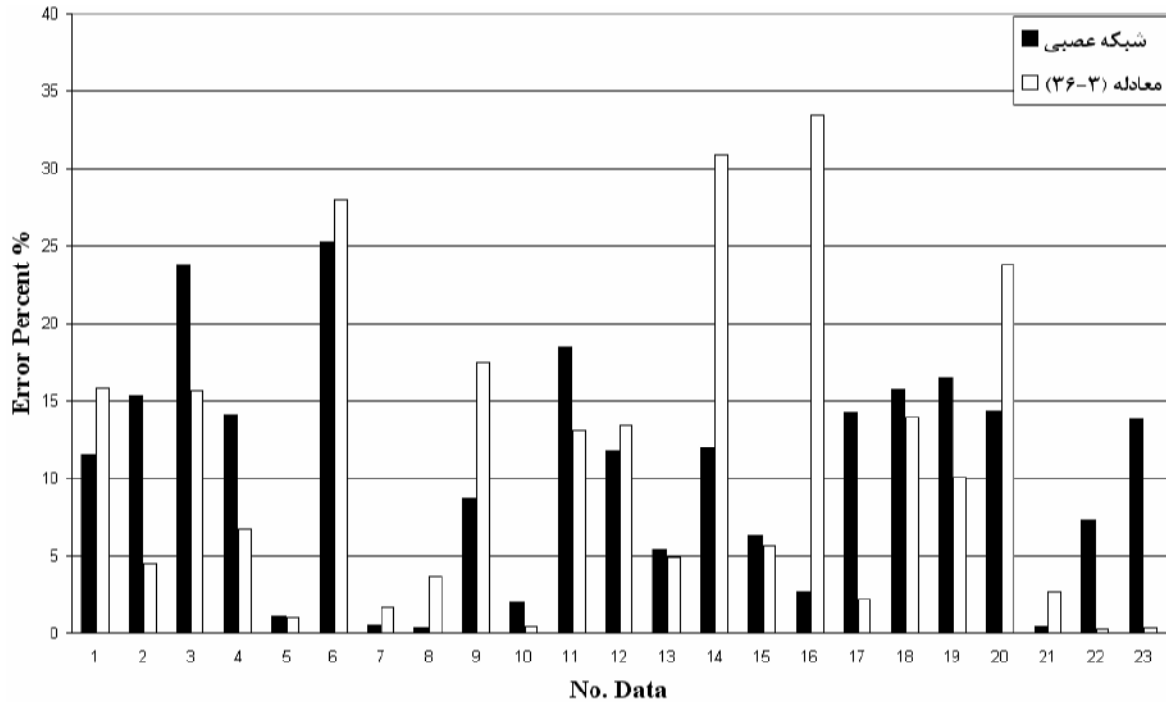


شکل (۳۳-۵) مقایسه نتایج شبکه عصبی و مقادير محاسبه شده از رابطه (۳-۳۶) با مقادير اندازه‌گیری شده برای

متغیر h_d/z

در شکل (۳۴-۵) درصد خطای بین مقدار واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۶) به ازای داده‌های تست نمایش داده شده است.

در جدول (۸-۵) مقدار درصد خطای ماکزیمم، درصد خطای میانگین و درصد انحراف معیار خطا بین مقادير واقعی و مقادير پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و رابطه (۳-۳۶) مقایسه شده‌اند.



شکل (۵-۳۴) مقایسه خطای تولید شده از روش‌های مختلف به ازای داده‌های تست برای متغیر h_d/z

جدول (۵-۸) مقایسه خطای روش‌های مختلف با استفاده از تحلیل آماری برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های تست

	$e_{max} \%$	$\bar{e} \%$	$\sigma_e \%$
شبکه عصبی	۲۵/۲۲	۱۰/۵۲	۷/۳۳
رابطه (۳-۳۶)	۳۳/۳۹	۱۰/۸۶	۱۰/۲۴

همانطور که از شکل (۵-۳۴) و جدول (۵-۸) پیداست، نتایج شبکه عصبی به نتایج رابطه (۳-۳۶)

خیلی نزدیک می‌باشد، ولی باز هم نتایج شبکه عصبی بهتر می‌باشد.

۵-۵- نتیجه‌گیری

در این فصل کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی آبستگي پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب بررسی شد. برای پیش‌بینی آبستگي موضعی پایین‌دست سازه‌های کنترل شیب با استفاده از شبکه‌های عصبی، چهار متغیر بی‌بعد شامل s/z , XS/z , XD/z , h_d/z تحلیل شدند. در ابتدا پارامترهای مؤثر بر هر متغیر مشخص شدند. سپس داده‌هایی که برای تحلیل بوسیله شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفتند، مشخص شدند. نتایج زیر حاصل تحلیل شبکه‌های عصبی برای متغیرهای آبستگي می‌باشد:

۱- برای متغیر s/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۵ پارامتر در لایه ورودی، ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۱۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر ۱۳/۵۱٪ می‌باشد. خطای روابط (۳-۳)، (۳-۳) و (۳-۳) به ترتیب ۷۱/۰۶٪، ۲۱/۸۰٪ و ۲۶/۵۵٪ می‌باشد.

۲- برای متغیر XS/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۴ پارامتر در لایه ورودی، ۵ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۳۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر ۶/۶۳٪ می‌باشد. خطای رابطه (۳-۳)، (۳-۳) می‌باشد.

۳- برای متغیر XD/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۵ پارامتر در لایه ورودی، ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۳۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر ۳/۴۲٪ می‌باشد. خطای رابطه (۳-۳)، (۳-۳) می‌باشد.

۴- برای متغیر h_d/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۴ پارامتر در لایه ورودی، ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۱۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر ۱۰/۵۲٪ می‌باشد. خطای رابطه (۳-۳)، (۳-۳) می‌باشد.

۵- شبکه‌های عصبی قادرند، ابعاد چاله آبستگي را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود و با استفاده از پارامترهای بی‌بعد به دست آمده از آنالیز ابعادی، بخوبی پیش‌بینی کنند.

فصل ششم

نتایج و پیشنهادات

۶-۱- نتایج

با توجه به اهداف مورد نظر پایان‌نامه، تحقیقات در دو قسمت انجام گردید. ابتدا روابط قبلی موجود در زمینه آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب ارزیابی شد و اثرات برخی پارامترهای مهم بر روی متغیرهای آبشستگی بررسی شدند. در ادامه، از شبکه عصبی به عنوان راهکاری جدید برای حل مسائل آبشستگی استفاده گردید. و در نهایت نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی MLP و روابط ارائه شده توسط محققین مختلف مورد مقایسه قرار گرفت.

در این فصل ضمن بیان نتایج حاصل از مطالعات انجام شده، به منظور ادامه روند تحقیقات در این زمینه پیشنهاداتی ارائه می‌گردد.

۱- برای پیش‌بینی عمق آبشستگی بیشینه، روابط زیر توسط محققین مختلف پیشنهاد شده‌اند:

الف - رابطه (۳-۳) (رابطه میسون و آروماگم (۱۹۸۵))

ب - رابطه (۱۸-۳) (رابطه بورمن و ژولین (۱۹۹۱))

بورمن و ژولین رابطه فوق را بر اساس مفهوم پخشیدگی جت و پایداری ذره در چاله آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل شیب و انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس بدست آوردند.

ج - روابط (۳۲-۳) و (۳۳-۳) (روابط دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴))

روابط دی‌آگوستینو و فرو بر اساس تحلیل خودتشابهی و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبره کردن معادلات پیشنهادی، استوار می‌باشد.

۲- برای پیش‌بینی موقعیت عمق آبشستگی بیشینه، رابطه (۳۴-۳) توسط دی‌آگوستینو (۲۰۰۴) و فرو پیشنهاد شده است:

۳- برای پیش‌بینی موقعیت پشته ته‌نشین شده، رابطه (۳۵-۳) توسط دی‌آگوستینو (۲۰۰۴) و فرو پیشنهاد شده است:

۴- برای پیش‌بینی ارتفاع پشته ته‌نشین شده، رابطه (۳۴-۳) توسط دی‌آگوستینو و فرو (۲۰۰۴) پیشنهاد شده است:

۵- در این تحقیق از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه MLP (سه لایه) با الگوریتم پس‌انتشار خطا برای همه مدل‌های شبکه عصبی استفاده شده است.

۶- برای متغیر s/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۵ پارامتر در لایه ورودی، ۷ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۱۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر $13/51\%$ می‌باشد. خطای روابط (۳-۳)، (۳-۳) و (۳-۳) به ترتیب $71/06\%$ ، $21/80\%$ و $26/55\%$ می‌باشد.

۷- برای متغیر XS/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۴ پارامتر در لایه ورودی، ۵ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۳۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر $6/63\%$ می‌باشد. خطای رابطه (۳-۳)، (۳-۳) و (۳-۳) می‌باشد.

۸- برای متغیر XD/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۵ پارامتر در لایه ورودی، ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۳۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر $3/42\%$ می‌باشد. خطای رابطه (۳-۳)، (۳-۳) و (۳-۳) می‌باشد.

۹- برای متغیر h_d/z پس از فرآیند آزمون و خطا، شبکه‌ای با ۴ پارامتر در لایه ورودی، ۶ نرون در لایه پنهان با تابع محرک سیگموئید و ۱ نرون در لایه خروجی با تابع محرک خطی با ۱۰۰ چرخه آموزشی به عنوان مدل بهینه شبکه عصبی بدست آمد. درصد خطای میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی به ازای داده‌های تست برابر $10/52\%$ می‌باشد. خطای رابطه (۳-۳)، (۳-۳) و (۳-۳) می‌باشد.

۱۰- شبکه‌های عصبی قادرند، ابعاد چاله آبستگي را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود و با استفاده از پارامترهای بی‌بعد به دست آمده از آنالیز ابعادی، بخوبی پیش‌بینی کنند.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به اهمیت مسأله آبستگي و مطالب عنوان شده در این پایان‌نامه، موارد زیر به عنوان کارهای تکمیلی در این زمینه پیشنهاد می‌گردد:

۱- به منظور تحقیقات مشابه در محدوده وسیعتری از داده‌ها و استفاده از تعداد پارامترهای بیشتر برای متغیرهای آبستگي انجام آزمایشات زیادتری توصیه می‌شود. به خصوص برای بررسی کاملتر و بهتر

- اثرات عمق پایاب، دبی، ارتفاع ریزش، اندازه مصالح و توزیع دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت مصالح، احتیاج به مطالعات وسیعتر با داده‌های بیشتری می‌باشد.
- ۲- از شبکه عصبی مصنوعی در محدوده وسیعتری از داده‌ها با استفاده از تعداد پارامترهای بیشتر برای پیش‌بینی متغیرهای آبشستگی استفاده شود.
- ۳- از انواع مختلف شبکه‌های عصبی مثل شبکه‌های عصبی RBF ، $GRNN$ و غیره برای پیش‌بینی آبشستگی استفاده شود و عملکرد آنها با یکدیگر و با شبکه MLP کار شده در پایان‌نامه مقایسه شود.
- ۴- روابط جدید با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بیشتر با استفاده از تکنیک رگرسیون ارائه گردد.
- ۵- تحلیل پارامتریک برای شبکه‌های مورد استفاده با استفاده از ورودی‌ها و خروجی‌های متفاوت، انجام شود.
- ۶- برای متغیرهای وابسته نسبت به متغیرهای مستقل استفاده شده برای برقراری مدل‌های شبکه عصبی تحلیل حساسیت شود.

بخش ضمیمه

جدول ۱ مجموعه داده‌های استفاده شده به عنوان پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه‌های عصبی برای همه متغیرهای
(h_d/d , XD/z , XS/z , s/z)

Test Number	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
1	0.08	0.338	0.69	0.042	0.423	0.124	0.09	0.069	1.707	0.6
2	0.085	0.338	0.69	0.042	0.423	0.129	0.09	0.069	1.707	0.6
3	0.092	0.359	0.718	0.07	0.423	0.339	0.09	0.069	1.707	0.6
4	0.121	0.366	0.746	0.085	0.423	0.464	0.09	0.069	1.707	0.6
5	0.127	0.373	0.746	0.077	0.423	0.478	0.09	0.069	1.707	0.6
6	0.127	0.401	0.831	0.099	0.423	0.762	0.09	0.069	1.707	0.6
7	0.12	0.493	1.007	0.092	0.423	0.152	0.179	0.137	1.707	0.6
8	0.117	0.556	1.056	0.11	0.423	0.18	0.179	0.137	1.707	0.6
9	0.134	0.606	1.021	0.092	0.423	0.37	0.179	0.137	1.707	0.6
10	0.148	0.5	1.056	0.099	0.423	0.808	0.179	0.137	1.707	0.6
11	0.134	0.521	1.07	0.113	0.423	0.972	0.179	0.137	1.707	0.6
12	0.163	0.662	1.282	0.12	0.423	0.397	0.269	0.206	1.707	0.6
13	0.156	0.739	1.331	0.141	0.423	0.518	0.269	0.206	1.707	0.6
14	0.176	0.732	1.261	0.113	0.423	0.833	0.269	0.206	1.707	0.6
15	0.169	0.592	1.282	0.134	0.423	0.993	0.269	0.206	1.707	0.6
16	0.162	0.648	1.514	0.176	0.423	0.338	0.359	0.275	1.707	0.6
17	0.204	0.69	1.514	0.162	0.423	0.414	0.359	0.275	1.707	0.6
18	0.183	0.627	1.444	0.169	0.423	0.653	0.359	0.275	1.707	0.6
19	0.183	0.711	1.486	0.155	0.423	0.858	0.359	0.275	1.707	0.6
20	0.204	0.725	1.725	0.225	0.423	0.435	0.449	0.343	1.707	0.6
21	0.246	0.669	1.676	0.225	0.423	0.488	0.449	0.343	1.707	0.6
22	0.225	0.732	1.718	0.211	0.423	0.575	0.449	0.343	1.707	0.6
23	0.239	0.655	1.775	0.214	0.423	0.748	0.449	0.343	1.707	0.6
24	0.246	0.725	1.634	0.204	0.423	0.907	0.449	0.343	1.707	0.6
25	0.22	0.81	1.859	0.232	0.423	0.594	0.539	0.412	1.707	0.6
26	0.232	0.796	1.824	0.239	0.423	0.603	0.539	0.412	1.707	0.6
27	0.218	0.761	1.775	0.19	0.423	0.705	0.539	0.412	1.707	0.6
28	0.261	0.711	1.775	0.225	0.423	0.919	0.539	0.412	1.707	0.6
29	0.275	0.817	1.986	0.268	0.423	0.609	0.629	0.481	1.707	0.6
30	0.286	0.803	1.986	0.261	0.423	0.737	0.629	0.481	1.707	0.6
31	0.275	0.789	1.93	0.246	0.423	0.951	0.629	0.481	1.707	0.6
32	0.268	0.88	2.155	0.296	0.423	0.614	0.718	0.549	1.707	0.6
33	0.296	0.817	2.099	0.296	0.423	0.751	0.718	0.549	1.707	0.6
34	0.303	0.761	2.12	0.289	0.423	0.751	0.718	0.549	1.707	0.6
35	0.289	0.887	2.028	0.254	0.423	0.965	0.718	0.549	1.707	0.6
36	0.359	0.894	2.324	0.338	0.423	0.8	0.808	0.618	1.707	0.6
37	0.338	0.901	2.268	0.324	0.423	0.856	0.808	0.618	1.707	0.6
38	0.394	0.986	2.366	0.352	0.423	0.848	0.898	0.687	1.707	0.6
39	0.401	0.993	2.401	0.317	0.423	0.906	0.898	0.687	1.707	0.6

ادامه جدول ۱

Test Number	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
40	0.159	0.524	1.049	0.11	0.732	0.302	0.156	0.119	1.707	0.6
41	0.22	0.646	1.341	0.134	0.732	2.744	0.156	0.119	1.707	0.6
42	0.249	0.732	1.561	0.183	0.732	0.277	0.311	0.238	1.707	0.6
43	0.244	0.732	1.537	0.183	0.732	0.345	0.311	0.238	1.707	0.6
44	0.268	0.78	1.573	0.171	0.732	0.495	0.311	0.238	1.707	0.6
45	0.341	0.902	1.841	0.183	0.732	2.78	0.311	0.238	1.707	0.6
46	0.317	0.854	2	0.244	0.732	0.532	0.466	0.357	1.707	0.6
47	0.354	0.902	2.049	0.22	0.732	0.849	0.466	0.357	1.707	0.6
48	0.366	0.841	2.073	0.232	0.732	1.309	0.466	0.357	1.707	0.6
49	0.402	1.073	2.195	0.232	0.732	2.684	0.466	0.357	1.707	0.6
50	0.378	1.024	2.183	0.268	0.732	2.824	0.466	0.357	1.707	0.6
51	0.341	1.244	2.427	0.232	0.732	3.96	0.466	0.357	1.707	0.6
52	0.354	0.976	2.317	0.317	0.732	0.884	0.622	0.476	1.707	0.6
53	0.427	1.195	2.451	0.28	0.732	2.662	0.622	0.476	1.707	0.6
54	0.402	1.085	2.671	0.366	0.732	0.901	0.777	0.595	1.707	0.6
55	0.476	1.073	2.768	0.354	0.732	1.135	0.777	0.595	1.707	0.6
56	0.488	1.341	2.939	0.378	0.732	2.635	0.777	0.595	1.707	0.6
57	0.451	1.183	2.951	0.439	0.732	1.079	0.933	0.714	1.707	0.6
58	0.549	1.268	3.098	0.415	0.732	2.171	0.933	0.714	1.707	0.6
59	0.561	1.305	3.232	0.476	0.732	1.375	1.089	0.833	1.707	0.6
60	0.512	1.268	3.256	0.488	0.732	1.78	1.089	0.833	1.707	0.6
61	0.544	1.512	3.232	0.476	0.732	2.677	1.089	0.833	1.707	0.6
62	0.537	1.366	3.451	0.537	0.732	1.485	1.243	0.952	1.707	0.6
63	0.573	1.537	3.561	0.512	0.732	2.263	1.243	0.952	1.707	0.6
64	0.61	1.524	3.72	0.573	0.732	1.946	1.399	1.071	1.707	0.6
65	0.646	1.512	3.829	0.573	0.732	1.966	1.555	1.19	1.707	0.6
66	0.634	1.585	3.854	0.549	0.732	2.199	1.555	1.19	1.707	0.6
67	0.085	0.43	0.725	0.042	0.211	0.158	0.179	0.137	1.707	0.3
68	0.155	0.465	0.831	0.063	0.211	0.62	0.179	0.137	1.707	0.3
69	0.162	0.549	1.099	0.099	0.211	0.279	0.359	0.275	1.707	0.3
70	0.19	0.592	1.099	0.106	0.211	0.63	0.359	0.275	1.707	0.3
71	0.197	0.577	1.338	0.162	0.211	0.295	0.539	0.412	1.707	0.3
72	0.211	0.683	1.366	0.148	0.211	0.64	0.539	0.412	1.707	0.3
73	0.261	0.69	1.613	0.183	0.211	0.376	0.718	0.549	1.707	0.3
74	0.239	0.796	1.606	0.183	0.211	0.654	0.718	0.549	1.707	0.3
75	0.31	0.838	1.676	0.204	0.211	0.697	0.898	0.687	1.707	0.3
76	0.085	0.528	0.845	0.035	0.211	0.124	0.179	0.137	1.707	0.3
77	0.092	0.521	0.845	0.042	0.211	0.215	0.179	0.137	1.707	0.3
78	0.11	0.493	0.859	0.049	0.211	0.326	0.179	0.137	1.707	0.3
79	0.12	0.528	0.887	0.049	0.211	0.454	0.179	0.137	1.707	0.3

ادامه جدول ۱

Test Number	S/z	XS/z	XD/z	h _d /z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
80	0.141	0.542	0.979	0.07	0.211	0.732	0.179	0.137	1.707	0.3
81	0.161	0.549	0.958	0.063	0.211	1.117	0.179	0.137	1.707	0.3
82	0.12	0.627	1.246	0.099	0.211	0.238	0.359	0.275	1.707	0.3
83	0.186	0.634	1.246	0.099	0.211	0.742	0.359	0.275	1.707	0.3
84	0.211	0.725	1.563	0.155	0.211	0.362	0.539	0.412	1.707	0.3
85	0.211	0.69	1.535	0.155	0.211	0.74	0.539	0.412	1.707	0.3
86	0.275	0.817	1.852	0.218	0.211	0.378	0.718	0.549	1.707	0.3
87	0.246	0.901	1.803	0.204	0.211	0.764	0.718	0.549	1.707	0.3
88	0.317	0.944	2	0.232	0.211	0.504	0.898	0.687	1.707	0.3
89	0.11	0.524	0.829	0.098	0.732	0.429	0.093	0.075	1.53	0.6
90	0.11	0.573	1.037	0.085	0.732	2.713	0.093	0.075	1.53	0.6
91	0.146	0.646	1.207	0.134	0.732	0.477	0.185	0.15	1.53	0.6
92	0.207	0.793	1.378	0.122	0.732	2.84	0.185	0.15	1.53	0.6
93	0.22	0.683	1.512	0.22	0.732	0.509	0.278	0.225	1.53	0.6
94	0.244	0.951	1.744	0.195	0.732	2.684	0.278	0.225	1.53	0.6
95	0.256	0.829	1.841	0.268	0.732	0.667	0.371	0.3	1.53	0.6
96	0.302	0.976	1.988	0.256	0.732	2.077	0.371	0.3	1.53	0.6
97	0.366	0.939	2.22	0.305	0.732	0.697	0.464	0.375	1.53	0.6
98	0.354	1.098	2.183	0.256	0.732	2.022	0.464	0.375	1.53	0.6
99	0.378	1.037	2.439	0.366	0.732	0.718	0.557	0.45	1.53	0.6
100	0.39	1.134	2.439	0.329	0.732	1.748	0.557	0.45	1.53	0.6
101	0.42	1.171	2.634	0.402	0.732	0.939	0.65	0.525	1.53	0.6
102	0.415	1.256	2.634	0.354	0.732	1.714	0.65	0.525	1.53	0.6
103	0.439	1.244	2.854	0.427	0.732	1.14	0.742	0.6	1.53	0.6
104	0.427	1.329	2.878	0.378	0.732	1.9	0.742	0.6	1.53	0.6
105	0.524	1.28	3.171	0.488	0.732	1.156	0.835	0.675	1.53	0.6
106	0.463	1.415	3.159	0.402	0.732	1.902	0.835	0.675	1.53	0.6
107	0.537	1.378	3.293	0.524	0.732	1.236	0.928	0.75	1.53	0.6
108	0.495	1.402	3.159	0.463	0.732	1.623	0.928	0.75	1.53	0.6
109	0.134	0.695	1.024	0.073	0.366	0.277	0.185	0.15	1.53	0.3
110	0.207	0.707	1.163	0.085	0.366	1.691	0.185	0.15	1.53	0.3
111	0.229	0.939	1.768	0.195	0.366	0.325	0.557	0.45	1.53	0.3
112	0.268	1.195	1.939	0.207	0.366	1.511	0.557	0.45	1.53	0.3
113	0.402	1.159	2.488	0.366	0.366	0.467	0.928	0.75	1.53	0.3
114	0.329	1.378	2.561	0.256	0.366	1.423	0.928	0.75	1.53	0.3
115	1	-----	-----	-----	3.333	0.316	0.451	0.451	1	1
116	0.911	-----	-----	-----	3.333	1.032	0.537	0.537	1	1
117	0.667	-----	-----	-----	3.333	1.404	0.562	0.562	1	1
118	1.067	-----	-----	-----	3.333	0.792	0.599	0.599	1	1
119	1.033	-----	-----	-----	3.333	1.217	0.655	0.655	1	1
120	1.389	-----	-----	-----	3.333	0.333	0.698	0.698	1	1

ادامه جدول ۱

Test Number	S/z	XS/z	XD/z	h _d /z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
121	1.278	-----	-----	-----	3.333	1.014	0.834	0.834	1	1
122	1.089	-----	-----	-----	3.333	1.393	0.908	0.908	1	1
123	1.4	-----	-----	-----	3.333	0.848	0.914	0.914	1	1
124	1.211	-----	-----	-----	3.333	1.116	0.914	0.914	1	1
125	0.389	-----	-----	-----	3.333	0.291	0.278	0.278	1	1
126	0.978	-----	-----	-----	3.333	0.323	0.537	0.537	1	1
127	0.556	-----	-----	-----	3.333	1.841	0.605	0.605	1	1
128	1.167	-----	-----	-----	3.333	0.358	0.673	0.673	1	1
129	0.833	-----	-----	-----	3.333	0.884	0.723	0.723	1	1
130	1.522	-----	-----	-----	3.333	0.354	0.797	0.797	1	1
131	0.689	-----	-----	-----	3.333	1.83	0.84	0.84	1	1
132	0.956	-----	-----	-----	3.333	1.362	0.871	0.871	1	1
133	1.611	-----	-----	-----	3.333	0.827	0.889	0.889	1	1
134	0.063	-----	-----	-----	0.488	0.1	0.047	0.047	1	1
135	0.057	-----	-----	-----	0.475	0.145	0.063	0.063	1	1
136	0.066	-----	-----	-----	0.473	0.16	0.076	0.076	1	1
137	0.075	-----	-----	-----	0.466	0.19	0.089	0.089	1	1
138	0.053	-----	-----	-----	0.441	0.215	0.048	0.048	1	1
139	0.074	-----	-----	-----	0.437	0.215	0.039	0.039	1	1
140	0.089	-----	-----	-----	0.447	0.225	0.074	0.074	1	1
141	0.098	-----	-----	-----	0.447	0.235	0.085	0.085	1	1
142	0.108	-----	-----	-----	0.452	0.233	0.096	0.096	1	1
143	0.048	-----	-----	-----	0.436	0.21	0.044	0.044	1	1
144	0.088	-----	-----	-----	0.441	0.22	0.07	0.07	1	1
145	0.092	-----	-----	-----	0.439	0.24	0.088	0.088	1	1
146	0.096	-----	-----	-----	0.438	0.25	0.097	0.097	1	1
147	0.106	-----	-----	-----	0.44	0.25	0.106	0.106	1	1
148	0.048	-----	-----	-----	0.481	0.092	0.035	0.035	1	1
149	0.061	-----	-----	-----	0.473	0.13	0.058	0.058	1	1
150	0.076	-----	-----	-----	0.477	0.135	0.076	0.076	1	1
151	0.085	-----	-----	-----	0.471	0.16	0.091	0.091	1	1
152	0.116	-----	-----	-----	0.484	0.14	0.106	0.106	1	1
153	0.137	-----	-----	-----	0.489	0.14	0.123	0.123	1	1
154	0.049	-----	-----	-----	0.45	0.165	0.041	0.041	1	1
155	0.086	-----	-----	-----	0.45	0.185	0.07	0.07	1	1
156	0.099	-----	-----	-----	0.451	0.2	0.095	0.095	1	1
157	0.096	-----	-----	-----	0.437	0.25	0.116	0.116	1	1
158	0.079	-----	-----	-----	0.493	0.05	0.025	0.025	1	1
159	0.098	-----	-----	-----	0.491	0.07	0.045	0.045	1	1
160	0.118	-----	-----	-----	0.49	0.09	0.067	0.067	1	1
161	0.128	-----	-----	-----	0.491	0.1	0.086	0.086	1	1

ادامه جدول ۱

Test Number	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
162	0.169	-----	-----	-----	0.496	0.1	0.104	0.104	1	1
163	0.18	-----	-----	-----	0.5	0.1	0.119	0.119	1	1
164	0.204	-----	-----	-----	0.509	0.09	0.136	0.136	1	1
165	0.096	-----	-----	-----	0.478	0.1	0.056	0.056	1	1
166	0.116	-----	-----	-----	0.482	0.1	0.072	0.072	1	1
167	0.153	-----	-----	-----	0.478	0.13	0.108	0.108	1	1
168	0.176	-----	-----	-----	0.488	0.12	0.134	0.134	1	1
169	0.223	-----	-----	-----	0.507	0.09	0.158	0.158	1	1
170	0.45	-----	-----	-----	10.5	0.634	0.385	0.239	2.583	1
171	0.793	-----	-----	-----	12.8	0.755	0.469	0.292	2.583	1
172	0.833	-----	-----	-----	17.5	0.992	0.641	0.399	2.583	1
173	0.423	-----	-----	-----	5.769	0.613	0.414	0.258	2.583	1
174	0.722	-----	-----	-----	8.333	0.848	0.599	0.372	2.583	1
175	1.083	-----	-----	-----	12.5	1.199	0.898	0.559	2.583	1
176	1.182	-----	-----	-----	13.64	1.285	0.98	0.61	2.583	1
177	0.35	-----	-----	-----	10.3	0.641	0.392	0.244	2.583	1
178	0.692	-----	-----	-----	15.38	0.951	0.621	0.387	2.583	1
179	0.292	-----	-----	-----	7.583	0.588	0.37	0.23	2.583	1
180	0.588	-----	-----	-----	15.44	0.888	0.566	0.352	2.583	1
181	0.185	-----	-----	-----	7.852	0.484	0.282	0.175	2.583	1
182	0.208	-----	-----	-----	15	0.832	0.52	0.324	2.583	1

جدول ۲ داده‌های آموزشی همه متغیرها ($h_d/d, XD/z, XS/z, s/z$)

No. Data	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
1	0.0803	0.338	0.6901	0.042	0.4225	0.1237	0.09	0.0688	1.7073	0.6
2	0.0845	0.338	0.6901	0.042	0.4225	0.1287	0.09	0.0688	1.7073	0.6
3	0.1211	0.3662	0.7465	0.085	0.4225	0.4641	0.09	0.0688	1.7073	0.6
4	0.1268	0.4014	0.831	0.099	0.4225	0.7617	0.09	0.0688	1.7073	0.6
5	0.1169	0.5563	1.0563	0.11	0.4225	0.1798	0.1794	0.1373	1.7073	0.6
6	0.1479	0.5	1.0563	0.099	0.4225	0.8079	0.1794	0.1373	1.7073	0.6
7	0.1338	0.5211	1.0704	0.113	0.4225	0.9722	0.1794	0.1373	1.7073	0.6
8	0.1563	0.7394	1.331	0.141	0.4225	0.518	0.2693	0.2061	1.7073	0.6
9	0.169	0.5915	1.2817	0.134	0.4225	0.9926	0.2693	0.2061	1.7073	0.6
10	0.162	0.6479	1.5141	0.176	0.4225	0.3382	0.3593	0.275	1.7073	0.6
11	0.1831	0.6268	1.4437	0.169	0.4225	0.6526	0.3593	0.275	1.7073	0.6
12	0.2042	0.7254	1.7254	0.225	0.4225	0.4352	0.4487	0.3434	1.7073	0.6
13	0.2465	0.669	1.6761	0.225	0.4225	0.4885	0.4487	0.3434	1.7073	0.6
14	0.2394	0.6549	1.7746	0.214	0.4225	0.7484	0.4487	0.3434	1.7073	0.6
15	0.2197	0.8099	1.8592	0.232	0.4225	0.594	0.5386	0.4122	1.7073	0.6
16	0.2324	0.7958	1.8239	0.239	0.4225	0.603	0.5386	0.4122	1.7073	0.6
17	0.2606	0.7113	1.7746	0.225	0.4225	0.9193	0.5386	0.4122	1.7073	0.6
18	0.2859	0.8028	1.9859	0.261	0.4225	0.7371	0.6286	0.4811	1.7073	0.6
19	0.2746	0.7887	1.9296	0.246	0.4225	0.9508	0.6286	0.4811	1.7073	0.6
20	0.2958	0.8169	2.0986	0.296	0.4225	0.751	0.718	0.5495	1.7073	0.6
21	0.2887	0.8873	2.0282	0.254	0.4225	0.9645	0.718	0.5495	1.7073	0.6
22	0.3592	0.8944	2.3239	0.338	0.4225	0.8	0.8079	0.6183	1.7073	0.6
23	0.3944	0.9859	2.3662	0.352	0.4225	0.8485	0.8979	0.6872	1.7073	0.6
24	0.1585	0.5244	1.0488	0.11	0.7317	0.3017	0.1558	0.1192	1.7073	0.6
25	0.2195	0.6463	1.3415	0.134	0.7317	2.7438	0.1558	0.1192	1.7073	0.6
26	0.2439	0.7317	1.5366	0.183	0.7317	0.3445	0.3106	0.2377	1.7073	0.6
27	0.3415	0.9024	1.8415	0.183	0.7317	2.7795	0.3106	0.2377	1.7073	0.6
28	0.3171	0.8537	2	0.244	0.7317	0.5321	0.4664	0.3569	1.7073	0.6
29	0.3659	0.8415	2.0732	0.232	0.7317	1.3088	0.4664	0.3569	1.7073	0.6
30	0.378	1.0244	2.1829	0.268	0.7317	2.8244	0.4664	0.3569	1.7073	0.6
31	0.3415	1.2439	2.4268	0.232	0.7317	3.9604	0.4664	0.3569	1.7073	0.6
32	0.4268	1.1951	2.4512	0.28	0.7317	2.662	0.6221	0.4761	1.7073	0.6
33	0.4756	1.0732	2.7683	0.354	0.7317	1.1349	0.777	0.5946	1.7073	0.6
34	0.4878	1.3415	2.939	0.378	0.7317	2.6351	0.777	0.5946	1.7073	0.6
35	0.5488	1.2683	3.0976	0.415	0.7317	2.1714	0.9327	0.7139	1.7073	0.6
36	0.5122	1.2683	3.2561	0.488	0.7317	1.7805	1.0885	0.8331	1.7073	0.6
37	0.5366	1.3659	3.4512	0.537	0.7317	1.4851	1.2434	0.9516	1.7073	0.6
38	0.6098	1.5244	3.7195	0.573	0.7317	1.9458	1.3991	1.0708	1.7073	0.6
39	0.6463	1.5122	3.8293	0.573	0.7317	1.966	1.5549	1.19	1.7073	0.6
40	0.6341	1.5854	3.8537	0.549	0.7317	2.199	1.5549	1.19	1.7073	0.6

ادامه جدول ۲

No. Data	S/z	XS/z	XD/z	h _d /z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
41	0.1549	0.4648	0.831	0.063	0.2113	0.6195	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
42	0.1901	0.5915	1.0986	0.106	0.2113	0.6302	0.3593	0.275	1.7073	0.3
43	0.1972	0.5775	1.338	0.162	0.2113	0.295	0.5386	0.4122	1.7073	0.3
44	0.2606	0.6901	1.6127	0.183	0.2113	0.3764	0.718	0.5495	1.7073	0.3
45	0.2394	0.7958	1.6056	0.183	0.2113	0.6542	0.718	0.5495	1.7073	0.3
46	0.0845	0.5282	0.8451	0.035	0.2113	0.1237	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
47	0.1099	0.493	0.8592	0.049	0.2113	0.326	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
48	0.1197	0.5282	0.8873	0.049	0.2113	0.4544	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
49	0.1606	0.5493	0.9577	0.063	0.2113	1.1165	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
50	0.1859	0.6338	1.2465	0.099	0.2113	0.7415	0.3593	0.275	1.7073	0.3
51	0.2113	0.7254	1.5634	0.155	0.2113	0.3619	0.5386	0.4122	1.7073	0.3
52	0.2746	0.8169	1.8521	0.218	0.2113	0.3783	0.718	0.5495	1.7073	0.3
53	0.3169	0.9437	2	0.232	0.2113	0.5041	0.8979	0.6872	1.7073	0.3
54	0.1098	0.5244	0.8293	0.098	0.7317	0.429	0.093	0.0752	1.5304	0.6
55	0.1463	0.6463	1.2073	0.134	0.7317	0.4769	0.1855	0.1499	1.5304	0.6
56	0.2073	0.7927	1.378	0.122	0.7317	2.84	0.1855	0.1499	1.5304	0.6
57	0.2439	0.9512	1.7439	0.195	0.7317	2.6838	0.2785	0.2251	1.5304	0.6
58	0.3024	0.9756	1.9878	0.256	0.7317	2.0769	0.3715	0.3003	1.5304	0.6
59	0.3659	0.939	2.2195	0.305	0.7317	0.6972	0.4639	0.375	1.5304	0.6
60	0.378	1.0366	2.439	0.366	0.7317	0.7183	0.5569	0.4502	1.5304	0.6
61	0.4195	1.1707	2.6341	0.402	0.7317	0.9388	0.6499	0.5254	1.5304	0.6
62	0.4146	1.2561	2.6341	0.354	0.7317	1.7143	0.6499	0.5254	1.5304	0.6
63	0.4268	1.3293	2.878	0.378	0.7317	1.9	0.7424	0.6001	1.5304	0.6
64	0.4634	1.4146	3.1585	0.402	0.7317	1.9024	0.8354	0.6753	1.5304	0.6
65	0.4951	1.4024	3.1585	0.463	0.7317	1.6234	0.9284	0.7505	1.5304	0.6
66	0.2073	0.7073	1.1634	0.085	0.3659	1.691	0.1855	0.1499	1.5304	0.3
67	0.2293	0.939	1.7683	0.195	0.3659	0.3246	0.5569	0.4502	1.5304	0.3
68	0.4024	1.1585	2.4878	0.366	0.3659	0.4665	0.9284	0.7505	1.5304	0.3
69	0.9111	-----	-----	-----	3.3333	1.0317	0.5373	0.5373	1	1
70	0.6667	-----	-----	-----	3.3333	1.4035	0.562	0.562	1	1
71	1.0333	-----	-----	-----	3.3333	1.2167	0.6546	0.6546	1	1
72	1.2778	-----	-----	-----	3.3333	1.0141	0.8337	0.8337	1	1
73	1.4	-----	-----	-----	3.3333	0.8481	0.914	0.914	1	1
74	0.3889	-----	-----	-----	3.3333	0.2907	0.2779	0.2779	1	1
75	0.9778	-----	-----	-----	3.3333	0.3226	0.5373	0.5373	1	1
76	0.8333	-----	-----	-----	3.3333	0.8841	0.7225	0.7225	1	1
77	1.5222	-----	-----	-----	3.3333	0.3535	0.7966	0.7966	1	1
78	0.6889	-----	-----	-----	3.3333	1.8298	0.8399	0.8399	1	1
79	1.6111	-----	-----	-----	3.3333	0.8267	0.8893	0.8893	1	1
80	0.0634	-----	-----	-----	0.4878	0.1	0.047	0.047	1	1

ادامه جدول ۲

No. Data	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
81	0.0663	-----	-----	-----	0.4735	0.16	0.0756	0.0756	1	1
82	0.0746	-----	-----	-----	0.4664	0.19	0.0893	0.0893	1	1
83	0.0743	-----	-----	-----	0.4371	0.215	0.0394	0.0394	1	1
84	0.0894	-----	-----	-----	0.4472	0.225	0.0744	0.0744	1	1
85	0.1085	-----	-----	-----	0.4521	0.233	0.0964	0.0964	1	1
86	0.048	-----	-----	-----	0.4363	0.21	0.0442	0.0442	1	1
87	0.0923	-----	-----	-----	0.4394	0.24	0.0885	0.0885	1	1
88	0.0964	-----	-----	-----	0.4382	0.25	0.0974	0.0974	1	1
89	0.0481	-----	-----	-----	0.4808	0.092	0.0351	0.0351	1	1
90	0.0615	-----	-----	-----	0.473	0.13	0.0582	0.0582	1	1
91	0.0848	-----	-----	-----	0.4713	0.16	0.0908	0.0908	1	1
92	0.1163	-----	-----	-----	0.4845	0.14	0.1064	0.1064	1	1
93	0.0495	-----	-----	-----	0.4496	0.165	0.0414	0.0414	1	1
94	0.0993	-----	-----	-----	0.4513	0.2	0.095	0.095	1	1
95	0.0962	-----	-----	-----	0.4374	0.25	0.1161	0.1161	1	1
96	0.0789	-----	-----	-----	0.4931	0.05	0.0249	0.0249	1	1
97	0.1175	-----	-----	-----	0.4897	0.09	0.0666	0.0666	1	1
98	0.1687	-----	-----	-----	0.496	0.1	0.1044	0.1044	1	1
99	0.18	-----	-----	-----	0.5	0.1	0.1188	0.1188	1	1
100	0.0956	-----	-----	-----	0.478	0.1	0.0562	0.0562	1	1
101	0.1157	-----	-----	-----	0.4822	0.1	0.0718	0.0718	1	1
102	0.1756	-----	-----	-----	0.4878	0.12	0.1342	0.1342	1	1
103	0.7927	-----	-----	-----	12.805	0.7548	0.469	0.2918	2.5833	1
104	0.8333	-----	-----	-----	17.5	0.9918	0.641	0.3988	2.5833	1
105	0.7222	-----	-----	-----	8.3333	0.8478	0.5987	0.3725	2.5833	1
106	1.0833	-----	-----	-----	12.5	1.1992	0.898	0.5587	2.5833	1
107	0.35	-----	-----	-----	10.3	0.6411	0.3917	0.2437	2.5833	1
108	0.6923	-----	-----	-----	15.385	0.9508	0.6213	0.3866	2.5833	1
109	0.5882	-----	-----	-----	15.441	0.8883	0.5656	0.3519	2.5833	1
110	0.2083	-----	-----	-----	15	0.8322	0.52	0.3236	2.5833	1

جدول ۳ داده‌های آزمون همه متغیرها ($h_d/d, XD/z, XS/z, s/z$)

No. Data	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
1	0.1268	0.3732	0.7465	0.0775	0.4225	0.4784	0.09	0.0688	1.7073	0.6
2	0.1338	0.6056	1.0211	0.0915	0.4225	0.3702	0.1794	0.1373	1.7073	0.6
3	0.1761	0.7324	1.2606	0.1127	0.4225	0.8333	0.2693	0.2061	1.7073	0.6
4	0.1831	0.7113	1.4859	0.1549	0.4225	0.8578	0.3593	0.275	1.7073	0.6
5	0.2465	0.7254	1.6338	0.2042	0.4225	0.907	0.4487	0.3434	1.7073	0.6
6	0.2746	0.8169	1.9859	0.2676	0.4225	0.6089	0.6286	0.4811	1.7073	0.6
7	0.3028	0.7606	2.1197	0.2887	0.4225	0.751	0.718	0.5495	1.7073	0.6
8	0.4014	0.993	2.4014	0.3169	0.4225	0.9063	0.8979	0.6872	1.7073	0.6
9	0.2683	0.7805	1.5732	0.1707	0.7317	0.4953	0.3106	0.2377	1.7073	0.6
10	0.4024	1.0732	2.1951	0.2317	0.7317	2.6838	0.4664	0.3569	1.7073	0.6
11	0.4024	1.0854	2.6707	0.3659	0.7317	0.9011	0.777	0.5946	1.7073	0.6
12	0.561	1.3049	3.2317	0.4756	0.7317	1.375	1.0885	0.8331	1.7073	0.6
13	0.5732	1.5366	3.561	0.5122	0.7317	2.2626	1.2434	0.9516	1.7073	0.6
14	0.162	0.5493	1.0986	0.0986	0.2113	0.2793	0.3593	0.275	1.7073	0.3
15	0.3099	0.838	1.6761	0.2042	0.2113	0.697	0.8979	0.6872	1.7073	0.3
16	0.1408	0.5423	0.9789	0.0704	0.2113	0.7317	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
17	0.2113	0.6901	1.5352	0.1549	0.2113	0.7404	0.5386	0.4122	1.7073	0.3
18	0.1098	0.5732	1.0366	0.0854	0.7317	2.7131	0.093	0.0752	1.5304	0.6
19	0.2561	0.8293	1.8415	0.2683	0.7317	0.6667	0.3715	0.3003	1.5304	0.6
20	0.3902	1.1341	2.439	0.3293	0.7317	1.7475	0.5569	0.4502	1.5304	0.6
21	0.5244	1.2805	3.1707	0.4878	0.7317	1.1558	0.8354	0.6753	1.5304	0.6
22	0.1341	0.6951	1.0244	0.0732	0.3659	0.2773	0.1855	0.1499	1.5304	0.3
23	0.3293	1.378	2.561	0.2561	0.3659	1.4229	0.9284	0.7505	1.5304	0.3
24	1.0667	-----	-----	-----	3.3333	0.7917	0.599	0.599	1	1
25	1.0889	-----	-----	-----	3.3333	1.3934	0.9078	0.9078	1	1
26	0.5556	-----	-----	-----	3.3333	1.8409	0.6052	0.6052	1	1
27	0.9556	-----	-----	-----	3.3333	1.3621	0.8707	0.8707	1	1
28	0.0529	-----	-----	-----	0.4409	0.215	0.0477	0.0477	1	1
29	0.0883	-----	-----	-----	0.4413	0.22	0.0704	0.0704	1	1
30	0.0763	-----	-----	-----	0.4771	0.135	0.0764	0.0764	1	1
31	0.0856	-----	-----	-----	0.4505	0.185	0.0696	0.0696	1	1
32	0.1277	-----	-----	-----	0.4912	0.1	0.0864	0.0864	1	1
33	0.1528	-----	-----	-----	0.4776	0.13	0.1079	0.1079	1	1
34	0.45	-----	-----	-----	10.5	0.6344	0.3846	0.2393	2.5833	1
35	1.1818	-----	-----	-----	13.636	1.2851	0.9797	0.6095	2.5833	1
36	0.1852	-----	-----	-----	7.8519	0.4836	0.2819	0.1754	2.5833	1

جدول ۴ داده‌های تست همه متغیرها ($h_d/d, XD/z, XS/z, s/z$)

No. Data	S/z	XS/z	XD/z	h_d/z	b/z	h/H	A ₅₀	A ₉₀	d ₉₀ /d ₅₀	b/B
1	0.0915	0.3592	0.7183	0.0704	0.4225	0.3393	0.09	0.0688	1.7073	0.6
2	0.1197	0.493	1.007	0.0915	0.4225	0.1519	0.1794	0.1373	1.7073	0.6
3	0.1634	0.662	1.2817	0.1197	0.4225	0.3965	0.2693	0.2061	1.7073	0.6
4	0.2042	0.6901	1.5141	0.162	0.4225	0.4141	0.3593	0.275	1.7073	0.6
5	0.2254	0.7324	1.7183	0.2113	0.4225	0.5749	0.4487	0.3434	1.7073	0.6
6	0.2183	0.7606	1.7746	0.1901	0.4225	0.7052	0.5386	0.4122	1.7073	0.6
7	0.2676	0.8803	2.1549	0.2958	0.4225	0.6138	0.718	0.5495	1.7073	0.6
8	0.338	0.9014	2.2676	0.3239	0.4225	0.8557	0.8079	0.6183	1.7073	0.6
9	0.2488	0.7317	1.561	0.1829	0.7317	0.2766	0.3106	0.2377	1.7073	0.6
10	0.3537	0.9024	2.0488	0.2195	0.7317	0.8487	0.4664	0.3569	1.7073	0.6
11	0.3537	0.9756	2.3171	0.3171	0.7317	0.8841	0.6221	0.4761	1.7073	0.6
12	0.4512	1.1829	2.9512	0.439	0.7317	1.0787	0.9327	0.7139	1.7073	0.6
13	0.5439	1.5122	3.2317	0.4756	0.7317	2.6774	1.0885	0.8331	1.7073	0.6
14	0.0845	0.4296	0.7254	0.0423	0.2113	0.1575	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
15	0.2113	0.6831	1.3662	0.1479	0.2113	0.6398	0.5386	0.4122	1.7073	0.3
16	0.0915	0.5211	0.8451	0.0423	0.2113	0.2146	0.1794	0.1373	1.7073	0.3
17	0.1197	0.6268	1.2465	0.0986	0.2113	0.238	0.3593	0.275	1.7073	0.3
18	0.2465	0.9014	1.8028	0.2042	0.2113	0.7639	0.718	0.5495	1.7073	0.3
19	0.2195	0.6829	1.5122	0.2195	0.7317	0.509	0.2785	0.2251	1.5304	0.6
20	0.3537	1.0976	2.1829	0.2561	0.7317	2.0225	0.4639	0.375	1.5304	0.6
21	0.439	1.2439	2.8537	0.4268	0.7317	1.1402	0.7424	0.6001	1.5304	0.6
22	0.5366	1.378	3.2927	0.5244	0.7317	1.2362	0.9284	0.7505	1.5304	0.6
23	0.2683	1.1951	1.939	0.2073	0.3659	1.5113	0.5569	0.4502	1.5304	0.3
24	1	-----	-----	-----	3.3333	0.3158	0.4508	0.4508	1	1
25	1.3889	-----	-----	-----	3.3333	0.3333	0.6978	0.6978	1	1
26	1.2111	-----	-----	-----	3.3333	1.1159	0.914	0.914	1	1
27	1.1667	-----	-----	-----	3.3333	0.3579	0.6731	0.6731	1	1
28	0.057	-----	-----	-----	0.4748	0.145	0.0631	0.0631	1	1
29	0.0984	-----	-----	-----	0.4472	0.235	0.0852	0.0852	1	1
30	0.1056	-----	-----	-----	0.4401	0.25	0.1058	0.1058	1	1
31	0.137	-----	-----	-----	0.4892	0.14	0.1233	0.1233	1	1
32	0.0982	-----	-----	-----	0.4912	0.07	0.0446	0.0446	1	1
33	0.2037	-----	-----	-----	0.5092	0.09	0.136	0.136	1	1
34	0.2229	-----	-----	-----	0.5066	0.09	0.1579	0.1579	1	1
35	0.4231	-----	-----	-----	5.7692	0.6132	0.4145	0.2579	2.5833	1
36	0.2917	-----	-----	-----	7.5833	0.5875	0.3695	0.2299	2.5833	1

جدول ۵ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر s/z به ازای داده‌های آموزش

No. Data	مقدار واقعی s/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.0803	0.1049	0.0716	-0.0535	30.66	10.81	166.64
2	0.0845	0.1052	0.0701	-0.0533	24.49	17.05	163.07
3	0.1211	0.1236	0.1049	-0.0381	2.04	13.40	131.45
4	0.1268	0.1348	0.1201	-0.0246	6.34	5.25	119.41
5	0.1169	0.1249	0.1161	0.0013	6.84	0.69	98.89
6	0.1479	0.1540	0.1457	0.0298	4.13	1.48	79.85
7	0.1338	0.1574	0.1564	0.0372	17.64	16.89	72.20
8	0.1563	0.1574	0.1530	0.0692	0.68	2.14	55.74
9	0.1690	0.1725	0.1828	0.0907	2.06	8.16	46.34
10	0.1620	0.1633	0.1919	0.1137	0.82	18.48	29.80
11	0.1831	0.1763	0.2034	0.1279	3.71	11.09	30.15
12	0.2042	0.1859	0.2251	0.1703	8.97	10.22	16.61
13	0.2465	0.1883	0.2168	0.1727	23.60	12.04	29.93
14	0.2394	0.2005	0.2298	0.1845	16.26	4.02	22.94
15	0.2197	0.2231	0.2522	0.2301	1.54	14.78	4.72
16	0.2324	0.2236	0.2518	0.2305	3.78	8.35	0.82
17	0.2606	0.2440	0.2494	0.2448	6.36	4.28	6.05
18	0.2859	0.2743	0.2825	0.2892	4.06	1.19	1.15
19	0.2746	0.2907	0.2739	0.2988	5.84	0.27	8.79
20	0.2958	0.3232	0.3145	0.3421	9.27	6.33	15.66
21	0.2887	0.3396	0.2967	0.3517	17.62	2.76	21.81
22	0.3592	0.3744	0.3441	0.3969	4.24	4.19	10.51
23	0.3944	0.4200	0.3746	0.4516	6.50	5.01	14.51
24	0.1585	0.1942	0.1594	0.0141	22.50	0.54	91.11
25	0.2195	0.2306	0.2437	0.1247	5.05	11.02	43.19
26	0.2439	0.2732	0.2067	0.1066	12.01	15.25	56.29
27	0.3415	0.3190	0.3053	0.2168	6.58	10.59	36.51
28	0.3171	0.3460	0.3293	0.2061	9.12	3.86	35.00
29	0.3659	0.3716	0.3520	0.2413	1.57	3.79	34.04
30	0.3780	0.3876	0.3797	0.3099	2.53	0.44	18.03
31	0.3415	0.3470	0.3396	0.3614	1.62	0.55	5.84
32	0.4268	0.4456	0.4215	0.3936	4.40	1.25	7.79
33	0.4756	0.4317	0.4759	0.4150	9.23	0.06	12.74
34	0.4878	0.4842	0.5068	0.4829	0.74	3.89	1.01
35	0.5488	0.5014	0.5474	0.5530	8.63	0.25	0.77
36	0.5122	0.5156	0.5182	0.6264	0.66	1.17	22.30
37	0.5366	0.5469	0.5383	0.7035	1.92	0.32	31.11

ادامه جدول ۵

No. Data	مقدار واقعی s/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
38	0.6098	0.5680	0.5882	0.8154	6.85	3.54	33.73
39	0.6463	0.6733	0.6593	0.9074	4.17	2.00	40.39
40	0.6341	0.6155	0.6390	0.9179	2.94	0.77	44.75
41	0.1549	0.1231	0.1312	0.0545	20.54	15.32	64.82
42	0.19014	0.1851	0.1959	0.1601	2.65	3.03	15.80
43	0.19718	0.2182	0.2076	0.2498	10.66	5.28	26.68
44	0.2606	0.2594	0.2675	0.3584	0.45	2.66	37.55
45	0.2394	0.2718	0.2431	0.3709	13.52	1.53	54.91
46	0.0845	0.0988	0.0785	0.0320	16.91	7.11	62.13
47	0.1099	0.1088	0.1076	0.0412	0.96	2.06	62.50
48	0.1197	0.1152	0.1225	0.0470	3.77	2.32	60.74
49	0.1606	0.1438	0.1750	0.0770	10.44	8.99	52.04
50	0.1859	0.1916	0.2029	0.1652	3.06	9.14	11.14
51	0.2113	0.2224	0.2036	0.2528	5.27	3.63	19.66
52	0.2746	0.2594	0.2672	0.3584	5.55	2.71	30.49
53	0.3169	0.3114	0.3136	0.4693	1.74	1.04	48.09
54	0.1098	0.0837	0.1325	0.0660	23.74	20.72	39.87
55	0.1463	0.1384	0.1680	0.1222	5.43	14.80	16.50
56	0.2073	0.1863	0.2275	0.2292	10.14	9.74	10.56
57	0.2439	0.2572	0.2228	0.2765	5.45	8.65	13.37
58	0.3024	0.3315	0.3010	0.3034	9.61	0.48	0.32
59	0.3659	0.3438	0.3314	0.2950	6.03	9.42	19.37
60	0.3780	0.3836	0.3424	0.3503	1.47	9.43	7.34
61	0.4195	0.4096	0.4421	0.4147	2.36	5.38	1.15
62	0.4146	0.4128	0.4077	0.4498	0.44	1.67	8.48
63	0.4268	0.4429	0.4439	0.5123	3.77	4.00	20.02
64	0.4634	0.4677	0.4629	0.5667	0.92	0.11	22.29
65	0.4951	0.4843	0.4651	0.6085	2.19	6.06	22.90
66	0.2073	0.1767	0.1970	0.1999	14.77	4.98	3.58
67	0.2293	0.2072	0.2543	0.3552	9.63	10.92	54.93
68	0.4024	0.4027	0.3921	0.5788	0.06	2.57	43.82
69	0.9111	0.8536	0.8859	0.7152	6.31	2.77	21.50
70	0.6667	0.7430	0.7087	0.7464	11.45	6.31	11.96
71	1.0333	0.8745	1.0212	0.7921	15.37	1.17	23.35
72	1.2778	1.2342	1.2619	0.8876	3.41	1.24	30.54
73	1.4000	1.5159	1.5164	0.9271	8.28	8.31	33.78
74	0.3889	0.4189	0.3766	0.5300	7.72	3.16	36.29
75	0.9778	0.9348	0.9811	0.6830	4.40	0.34	30.15

ادامه جدول ۵

No. Data	مقدار واقعی s/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
76	0.8333	1.0224	0.8744	0.8168	22.69	4.93	1.98
77	1.5222	1.5113	1.5273	0.8361	0.72	0.33	45.07
78	0.6889	0.6926	0.6754	0.9282	0.54	1.96	34.74
79	1.6111	1.4974	1.4845	0.9116	7.06	7.86	43.42
80	0.0634	0.0740	0.0725	0.1924	16.69	14.33	203.40
81	0.0663	0.0995	0.0521	0.2108	50.10	21.40	218.01
82	0.0746	0.1098	0.0617	0.2198	47.13	17.32	194.53
83	0.0743	0.0337	0.0563	0.1897	54.64	24.23	155.31
84	0.0894	0.0805	0.0880	0.2113	10.00	1.62	136.23
85	0.1085	0.1070	0.1011	0.2248	1.38	6.82	107.19
86	0.0480	0.0393	0.0554	0.1923	18.11	15.43	300.68
87	0.0923	0.0906	0.1139	0.2197	1.81	23.45	138.11
88	0.0964	0.0989	0.1302	0.2253	2.59	35.05	133.70
89	0.0481	0.0546	0.0645	0.1846	13.57	34.16	283.97
90	0.0615	0.0793	0.0517	0.1993	28.95	15.93	224.09
91	0.0848	0.1153	0.0654	0.2196	35.93	22.90	158.88
92	0.1163	0.1410	0.0988	0.2287	21.26	15.03	96.68
93	0.0495	0.0445	0.0203	0.1895	10.03	58.96	283.13
94	0.0993	0.1063	0.0693	0.2225	7.07	30.20	124.12
95	0.0962	0.1174	0.1255	0.2362	21.99	30.41	145.43
96	0.0789	0.0474	0.1306	0.1776	39.92	65.54	125.11
97	0.1175	0.0998	0.1227	0.2035	15.09	4.40	73.14
98	0.1687	0.1471	0.1647	0.2265	12.78	2.34	34.30
99	0.1800	0.1649	0.1888	0.2352	8.39	4.89	30.67
100	0.0956	0.0801	0.0869	0.1971	16.22	9.10	106.17
101	0.1157	0.1015	0.1115	0.2065	12.29	3.65	78.45
102	0.1756	0.1724	0.1676	0.2443	1.83	4.56	39.12
103	0.7927	0.5535	0.5076	0.5670	30.17	35.96	28.47
104	0.8333	0.6760	0.6740	0.9984	18.88	19.12	19.81
105	0.7222	0.7046	0.7173	0.3423	2.44	0.68	52.60
106	1.0833	1.1486	1.1094	0.8172	6.02	2.41	24.57
107	0.3500	0.3649	0.4160	0.3459	4.26	18.86	1.17
108	0.6923	0.7310	0.7292	0.8408	5.59	5.33	21.45
109	0.5882	0.6084	0.6066	0.8093	3.43	3.12	37.58
110	0.2083	0.5275	0.5182	0.7500	153.20	148.74	260.00

جدول ۶ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۷ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر s/z به ازای داده‌های آزمون

No. Data	مقدار واقعی s/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.1268	0.1243	0.1116	-0.0374	1.94	11.96	129.50
2	0.1338	0.1360	0.0886	0.0099	1.64	33.78	92.60
3	0.1761	0.1685	0.1721	0.0835	4.29	2.25	52.57
4	0.1831	0.1839	0.1984	0.1372	0.44	8.36	25.07
5	0.2465	0.2087	0.2246	0.1917	15.33	8.88	22.22
6	0.2746	0.2651	0.2933	0.2833	3.48	6.79	3.15
7	0.3028	0.3232	0.3145	0.3421	6.73	3.86	12.97
8	0.4014	0.4232	0.3580	0.4543	5.43	10.81	13.18
9	0.2683	0.2881	0.2981	0.1134	7.38	11.11	57.73
10	0.4024	0.3922	0.3441	0.3036	2.54	14.50	24.56
11	0.4024	0.4247	0.5511	0.4044	5.53	36.94	0.49
12	0.5610	0.5109	0.5051	0.6080	8.93	9.96	8.38
13	0.5732	0.5361	0.6178	0.7387	6.47	7.79	28.88
14	0.1620	0.1625	0.1475	0.1443	0.33	8.93	10.91
15	0.3099	0.3223	0.2722	0.4780	4.01	12.15	54.26
16	0.1408	0.1283	0.1244	0.0596	8.91	11.68	57.68
17	0.2113	0.2427	0.2666	0.2700	14.88	26.19	27.80
18	0.1098	0.1074	0.1544	0.1695	2.15	40.68	54.43
19	0.2561	0.2882	0.3174	0.2396	12.54	23.94	6.44
20	0.3902	0.3864	0.3880	0.3969	0.98	0.58	1.71
21	0.5244	0.4564	0.4525	0.5329	12.97	13.71	1.62
22	0.1341	0.0688	0.1496	0.1359	48.71	11.52	1.31
23	0.3293	0.3956	0.4232	0.6221	20.15	28.53	88.93
24	1.0667	0.9512	0.6388	0.7404	10.83	40.11	30.59
25	1.0889	1.1937	1.3340	0.9481	9.63	22.51	12.93
26	0.5556	0.5631	0.2252	0.7915	1.36	59.46	42.47
27	0.9556	1.1088	1.2806	0.9251	16.04	34.02	3.19
28	0.0529	0.0460	0.0625	0.1948	13.06	18.13	268.17
29	0.0883	0.0726	0.0816	0.2083	17.74	7.55	136.00
30	0.0763	0.1033	0.0694	0.2105	35.32	9.09	175.76
31	0.0856	0.0783	0.0501	0.2069	8.51	41.46	141.75
32	0.1277	0.1240	0.1355	0.2157	2.90	6.11	68.91
33	0.1528	0.1387	0.1128	0.2286	9.24	26.19	49.59
34	0.4500	0.3631	0.3869	0.3551	19.31	14.02	21.09
35	1.1818	1.1737	1.1455	0.9463	0.69	3.07	19.93
36	0.1852	0.1354	0.1361	0.1077	26.88	26.51	41.84

جدول ۷ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادلات (۳-۳)، (۳۲-۳) و (۳۳-۳) به ازای داده‌های تست برای

متغیر s/z

No. Data	مقدار واقعی s/z	شبکه عصبی	معادله (۳-۳)	معادله (۳۲-۳)	معادله (۳۳-۳)	درصد خطا شبکه عصبی	درصد خطا معادله (۳-۳)	درصد خطا معادله (۳۲-۳)	درصد خطا معادله (۳۳-۳)
1	0.0915	0.1173	0.0113	0.0930	0.0884	28.13	87.69	1.54	3.39
2	0.1197	0.1232	0.2408	0.1493	0.1337	2.91	101.18	24.71	11.65
3	0.1634	0.1519	0.2352	0.1662	0.1687	7.03	43.97	1.72	3.27
4	0.2042	0.1666	0.3268	0.1930	0.1996	18.42	60.00	5.52	2.26
5	0.2254	0.1923	0.3169	0.2085	0.2268	14.67	40.63	7.50	0.63
6	0.2183	0.2298	0.4042	0.2239	0.249	5.26	85.16	2.58	14.06
7	0.2676	0.3130	0.5873	0.2676	0.2926	16.96	119.47	0.00	9.33
8	0.3380	0.3782	0.5958	0.2732	0.3126	11.88	76.25	19.17	7.53
9	0.2488	0.2660	0.4244	0.2585	0.2121	6.92	70.59	3.92	14.75
10	0.3537	0.3581	0.4220	0.2805	0.266	1.26	19.31	20.69	24.80
11	0.3537	0.3880	0.5829	0.3268	0.3133	9.71	64.83	7.59	11.43
12	0.4512	0.4706	0.8366	0.3976	0.3976	4.30	85.41	11.89	11.89
13	0.5439	0.5277	0.7902	0.3854	0.4328	2.98	45.29	29.15	20.42
14	0.0845	0.1005	0.2437	0.1549	0.1304	18.93	188.33	83.33	54.31
15	0.2113	0.2378	0.4423	0.2282	0.249	12.56	109.33	8.00	17.86
16	0.0915	0.1033	0.2099	0.1606	0.1337	12.84	129.23	75.38	46.00
17	0.1197	0.1596	0.4000	0.2310	0.1981	33.31	234.12	92.94	65.46
18	0.2465	0.2770	0.4366	0.2408	0.2969	12.38	77.14	2.29	20.45
19	0.2195	0.2056	0.4293	0.2488	0.266	6.34	95.56	13.33	21.16
20	0.3537	0.3600	0.4195	0.2756	0.357	1.79	18.62	22.07	0.95
21	0.4390	0.4323	0.9122	0.3829	0.4561	1.53	107.78	12.78	3.89
22	0.5366	0.4812	1.1122	0.4268	0.5157	10.32	107.27	20.45	3.89
23	0.2683	0.3066	0.6098	0.3512	0.3976	14.28	127.27	30.91	48.19
24	1.0000	0.8283	0.8000	0.8222	0.4315	17.17	20.00	17.78	56.85
25	1.3889	1.1626	1.1333	1.0444	0.5463	16.29	18.40	24.80	60.66
26	1.2111	1.3769	1.1556	1.0333	0.6474	13.69	4.59	14.68	46.54
27	1.1667	1.0974	1.1000	1.0111	0.4738	5.94	5.71	13.33	59.39
28	0.0570	0.0860	0.1453	0.0988	0.119	50.93	155.00	73.33	108.77
29	0.0984	0.0920	0.1449	0.1055	0.139	6.49	47.27	7.27	41.28
30	0.1056	0.1087	0.1435	0.1162	0.1341	2.90	35.83	10.00	26.92
31	0.1370	0.1614	0.2446	0.1448	0.1513	17.82	78.57	5.71	10.46
32	0.0982	0.0729	0.1051	0.0914	0.0749	25.79	7.00	7.00	23.80
33	0.2037	0.1885	0.2637	0.1660	0.1451	7.45	29.50	18.50	28.76
34	0.2229	0.2081	0.2644	0.1793	0.1387	6.64	18.64	19.55	37.79
35	0.4231	0.5824	0.4362	0.4462	0.3978	37.66	3.09	5.45	5.98
36	0.2917	0.3580	0.4092	0.4958	0.3819	22.74	40.29	70.00	30.92

جدول ۸ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XS/z به ازای داده‌های آموزش

No. Data	مقدار واقعی XS/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.338	0.3366	0.3681	0.4069	0.42	8.90	20.37
2	0.338	0.3395	0.3682	0.4073	0.44	8.93	20.49
3	0.3662	0.4369	0.3731	0.4349	19.31	1.88	18.76
4	0.4014	0.4178	0.3781	0.4595	4.08	5.81	14.47
5	0.5563	0.5348	0.5142	0.4682	3.87	7.57	15.84
6	0.5	0.5	0.5119	0.52	0.00	2.38	4.00
7	0.5211	0.4909	0.5121	0.5336	5.80	1.73	2.39
8	0.7394	0.591	0.6045	0.5532	20.07	18.25	25.19
9	0.5915	0.5684	0.5971	0.5923	3.91	0.94	0.13
10	0.6479	0.6657	0.6767	0.5955	2.75	4.45	8.09
11	0.6268	0.6528	0.6655	0.6214	4.15	6.18	0.86
12	0.7254	0.7214	0.7263	0.6602	0.54	0.13	8.98
13	0.669	0.7195	0.7234	0.6646	7.55	8.13	0.66
14	0.6549	0.7105	0.7109	0.6861	8.48	8.55	4.76
15	0.8099	0.7706	0.7648	0.7304	4.85	5.56	9.81
16	0.7958	0.7703	0.7642	0.7312	3.20	3.97	8.11
17	0.7113	0.7613	0.7448	0.7572	7.03	4.71	6.46
18	0.8028	0.8163	0.8013	0.7993	1.68	0.19	0.44
19	0.7887	0.8113	0.7844	0.8169	2.86	0.55	3.57
20	0.8169	0.8604	0.8522	0.8572	5.32	4.32	4.93
21	0.8873	0.8565	0.83	0.8748	3.47	6.46	1.41
22	0.8944	0.8998	0.9094	0.9184	0.61	1.68	2.69
23	0.9859	0.9354	0.98	0.9795	5.12	0.60	0.65
24	0.5244	0.5245	0.5566	0.6472	0.02	6.14	23.42
25	0.6463	0.6941	0.7132	0.8486	7.39	10.34	31.29
26	0.7317	0.7493	0.7344	0.7491	2.40	0.37	2.38
27	0.9024	0.915	0.8983	0.9498	1.39	0.46	5.25
28	0.8537	0.9019	0.8845	0.8634	5.65	3.61	1.14
29	0.8415	0.9557	0.9831	0.9274	13.58	16.83	10.21
30	1.0244	1.0996	1.0541	1.0524	7.34	2.90	2.73
31	1.2439	1.2301	1.2439	1.146	1.11	0.00	7.87
32	1.1951	1.2259	1.203	1.1378	2.58	0.66	4.80
33	1.0732	1.166	1.1656	1.1102	8.65	8.61	3.45
34	1.3415	1.3372	1.334	1.2339	0.32	0.56	8.02
35	1.2683	1.3657	1.3776	1.2946	7.68	8.62	2.07
36	1.2683	1.3838	1.3919	1.3612	9.11	9.75	7.33
37	1.3659	1.3988	1.4228	1.4351	2.41	4.17	5.07

ادامه جدول ۸

No. Data	مقدار واقعی XS/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
38	1.5244	1.4966	1.4932	1.572	1.82	2.05	3.12
39	1.5122	1.5287	1.5203	1.6725	1.09	0.54	10.60
40	1.5854	1.5613	1.5329	1.6917	1.52	3.31	6.71
41	0.4648	0.5132	0.5154	0.4995	10.42	10.89	7.47
42	0.5915	0.6157	0.6106	0.6146	4.08	3.22	3.90
43	0.5775	0.5817	0.6415	0.7008	0.73	11.09	21.36
44	0.6901	0.75	0.7502	0.8214	8.67	8.70	19.02
45	0.7958	0.7959	0.8071	0.8443	0.02	1.42	6.10
46	0.5282	0.5032	0.4991	0.4586	4.73	5.50	13.17
47	0.493	0.5072	0.5059	0.4753	2.89	2.63	3.58
48	0.5282	0.5098	0.5101	0.4859	3.48	3.42	8.00
49	0.5493	0.5243	0.5305	0.5405	4.55	3.42	1.60
50	0.6338	0.6165	0.622	0.6238	2.73	1.86	1.58
51	0.7254	0.7244	0.6534	0.7063	0.13	9.92	2.63
52	0.8169	0.75	0.7506	0.8215	8.19	8.12	0.56
53	0.9437	0.946	0.942	0.9461	0.25	0.18	0.26
54	0.5244	0.5066	0.484	0.6212	3.39	7.70	18.46
55	0.6463	0.6297	0.6367	0.6871	2.57	1.49	6.31
56	0.7927	0.7617	0.7655	0.8819	3.91	3.43	11.26
57	0.9512	0.8854	0.8827	0.9314	6.92	7.20	2.08
58	0.9756	0.9476	0.9789	0.9438	2.87	0.34	3.26
59	0.939	0.9318	0.9233	0.892	0.77	1.67	5.01
60	1.0366	1.009	0.9947	0.9561	2.66	4.04	7.76
61	1.1707	1.0933	1.0864	1.0366	6.61	7.20	11.46
62	1.2561	1.1667	1.1794	1.1006	7.12	6.11	12.38
63	1.3293	1.2504	1.2621	1.1778	5.93	5.05	11.39
64	1.4146	1.3063	1.3168	1.2404	7.66	6.92	12.32
65	1.4024	1.3207	1.3295	1.2798	5.83	5.20	8.74
66	0.7073	0.7091	0.7067	0.6903	0.25	0.09	2.41
67	0.939	0.9368	0.9392	0.8267	0.24	0.02	11.96
68	1.1585	1.1593	1.1585	1.0874	0.07	0.00	6.14

جدول ۹ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۵ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XS/z به ازای داده‌های آزمون

No. Data	مقدار واقعی XS/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.3732	0.436	0.3733	0.4361	16.82	0.02	16.84
2	0.6056	0.5244	0.513	0.4839	13.41	15.30	20.10
3	0.7324	0.5759	0.5992	0.5792	21.37	18.19	20.92
4	0.7113	0.6445	0.6595	0.6383	9.39	7.28	10.26
5	0.7254	0.7051	0.7042	0.6991	2.79	2.92	3.62
6	0.8169	0.8193	0.8124	0.7888	0.29	0.55	3.44
7	0.7606	0.8604	0.8522	0.8572	13.13	12.05	12.71
8	0.993	0.9347	0.9697	0.9842	5.87	2.34	0.88
9	0.7805	0.756	0.757	0.7615	3.14	3.01	2.43
10	1.0732	1.0844	1.0561	1.0408	1.05	1.59	3.02
11	1.0854	1.1446	1.1421	1.091	5.46	5.23	0.52
12	1.3049	1.3358	1.3549	1.3278	2.37	3.83	1.76
13	1.5366	1.5003	1.493	1.4992	2.36	2.84	2.43
14	0.5493	0.6136	0.5753	0.5856	11.71	4.73	6.61
15	0.838	0.9407	0.9707	0.962	12.25	15.83	14.79
16	0.5423	0.5157	0.519	0.5088	4.90	4.29	6.17
17	0.6901	0.7536	0.7215	0.7375	9.20	4.54	6.86
18	0.5732	0.6001	0.624	0.8095	4.70	8.87	41.23
19	0.8293	0.8445	0.8479	0.8275	1.84	2.25	0.21
20	1.1341	1.0975	1.1165	1.0409	3.23	1.56	8.22
21	1.2805	1.2243	1.2307	1.1789	4.39	3.89	7.93
22	0.6951	0.6805	-2.0152	0.5737	2.10	389.91	17.47
23	1.378	1.3112	5.1913	1.1663	4.85	276.71	15.37

جدول ۱۰ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادله (۳-۳۴) به ازای داده‌های تست برای متغیر XS/z

No. Data	مقدار واقعی XS/z	شبکه عصبی	معادله (۳-۳۴)	درصد خطا شبکه عصبی	درصد خطا معادله (۳-۳۴)
1	0.3592	0.445	0.3917	23.90	9.06
2	0.493	0.5345	0.5891	8.43	19.49
3	0.662	0.5969	0.633	9.83	4.31
4	0.6901	0.6626	0.719	3.99	4.12
5	0.7324	0.7165	0.7651	2.17	4.46
6	0.7606	0.7673	0.812	0.89	6.73
7	0.8803	0.8631	0.94	1.95	6.82
8	0.9014	0.899	0.954	0.27	5.88
9	0.7317	0.7462	1.014	1.98	38.59
10	0.9024	0.9221	1.07	2.18	18.58
11	0.9756	1.0457	1.214	7.18	24.46
12	1.1829	1.2405	1.426	4.87	20.58
13	1.5122	1.5067	1.376	0.36	9.02
14	0.4296	0.5038	0.516	17.28	20.20
15	0.6831	0.7542	0.723	10.41	5.81
16	0.5211	0.5049	0.498	3.11	4.44
17	0.6268	0.6134	0.675	2.13	7.68
18	0.9014	0.9231	0.8068	2.41	10.49
19	0.6829	0.7396	0.9211	8.30	34.88
20	1.0976	1.0399	0.9887	5.25	9.92
21	1.2439	1.1706	1.3095	5.89	5.27
22	1.378	1.2778	1.4361	7.27	4.21
23	1.1951	0.9279	0.9786	22.36	18.12

جدول ۱۱ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XD/z به ازای داده‌های آموزش

No. Data	مقدار واقعی XD/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.6901	0.7178	0.6987	0.8399	4.01	1.24	21.70
2	0.6901	0.7182	0.6984	0.8405	4.07	1.20	21.79
3	0.7465	0.7501	0.7646	0.8796	0.49	2.43	17.83
4	0.831	0.7784	0.8056	0.9144	6.33	3.05	10.04
5	1.0563	1.0176	1.0093	1.0192	3.67	4.45	3.52
6	1.0563	1.0659	1.0887	1.0925	0.91	3.06	3.42
7	1.0704	1.0793	1.063	1.1116	0.83	0.69	3.85
8	1.331	1.2902	1.299	1.2324	3.06	2.40	7.41
9	1.2817	1.3231	1.297	1.2877	3.23	1.19	0.47
10	1.5141	1.523	1.5286	1.3851	0.59	0.96	8.52
11	1.4437	1.5074	1.4998	1.4218	4.42	3.89	1.51
12	1.7254	1.7205	1.7264	1.5691	0.28	0.06	9.06
13	1.6761	1.6816	1.7124	1.5754	0.33	2.17	6.01
14	1.7746	1.6834	1.6572	1.6057	5.14	6.62	9.52
15	1.8592	1.8318	1.8621	1.7614	1.47	0.16	5.26
16	1.8239	1.8288	1.8588	1.7625	0.27	1.91	3.37
17	1.7746	1.8308	1.7828	1.7994	3.16	0.46	1.39
18	1.9859	1.944	1.9715	1.9518	2.11	0.73	1.72
19	1.9296	1.9455	1.9207	1.9768	0.83	0.46	2.45
20	2.0986	2.1206	2.1207	2.1262	1.05	1.05	1.32
21	2.0282	2.0377	2.0643	2.1511	0.47	1.78	6.06
22	2.3239	2.2955	2.2551	2.3056	1.22	2.96	0.79
23	2.3662	2.3843	2.3908	2.485	0.77	1.04	5.02
24	1.0488	1.0507	1.0506	1.2412	0.18	0.17	18.35
25	1.3415	1.3424	1.3351	1.5262	0.07	0.47	13.77
26	1.5366	1.5372	1.5523	1.5453	0.04	1.02	0.57
27	1.8415	1.8203	1.8495	1.8294	1.15	0.44	0.66
28	2	1.987	1.9852	1.868	0.65	0.74	6.60
29	2.0732	2.0712	2.078	1.9587	0.10	0.23	5.52
30	2.1829	2.2405	2.1664	2.1355	2.64	0.76	2.17
31	2.4268	2.3719	2.4319	2.2681	2.26	0.21	6.54
32	2.4512	2.575	2.4741	2.4174	5.05	0.93	1.38
33	2.7683	2.7156	2.7608	2.5383	1.90	0.27	8.31
34	2.939	2.8732	2.9101	2.7134	2.24	0.98	7.68
35	3.0976	3.0902	3.1127	2.9601	0.24	0.49	4.44
36	3.2561	3.2879	3.2531	3.2153	0.98	0.09	1.25
37	3.4512	3.4702	3.4551	3.4799	0.55	0.11	0.83

ادامه جدول ۱۱

No. Data	مقدار واقعی XD/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
38	3.7195	3.6911	3.7235	3.8346	0.76	0.11	3.09
39	3.8293	3.839	3.8268	4.1378	0.25	0.06	8.06
40	3.8537	3.8535	3.8528	4.165	0.00	0.02	8.08
41	0.831	0.8822	0.8205	0.7879	6.16	1.26	5.18
42	1.0986	1.1929	1.1824	1.1367	8.58	7.63	3.47
43	1.338	1.4183	1.4205	1.444	6.00	6.16	7.92
44	1.6127	1.7333	1.7409	1.7999	7.48	7.95	11.61
45	1.6056	1.6357	1.6226	1.8323	1.87	1.06	14.12
46	0.8451	0.8353	0.842	0.7301	1.16	0.36	13.60
47	0.8592	0.8546	0.8872	0.7537	0.53	3.26	12.27
48	0.8873	0.8667	0.8623	0.7687	2.32	2.82	13.37
49	0.9577	0.928	0.9671	0.8459	3.11	0.98	11.68
50	1.2465	1.2013	1.1862	1.1496	3.62	4.84	7.77
51	1.5634	1.421	1.4361	1.4518	9.11	8.14	7.14
52	1.8521	1.7298	1.7407	1.8001	6.60	6.02	2.81
53	2	1.9983	1.9863	2.1623	0.09	0.69	8.12
54	0.8293	0.8231	0.8287	1.2846	0.74	0.07	54.91
55	1.2073	1.2205	1.2039	1.4688	1.09	0.28	21.66
56	1.378	1.3946	1.3866	1.7445	1.20	0.62	26.59
57	1.7439	1.7205	1.7366	1.906	1.34	0.42	9.30
58	1.9878	1.9861	1.9834	2.0148	0.09	0.22	1.36
59	2.2195	2.1834	2.2182	2.0323	1.63	0.06	8.43
60	2.439	2.4335	2.4344	2.2144	0.23	0.19	9.21
61	2.6341	2.6633	2.6375	2.4198	1.11	0.13	8.14
62	2.6341	2.6953	2.6594	2.5103	2.32	0.96	4.70
63	2.878	2.8912	2.8827	2.7105	0.46	0.16	5.82
64	3.1585	3.0587	3.1239	2.8905	3.16	1.10	8.49
65	3.1585	3.1983	3.1755	3.0375	1.26	0.54	3.83
66	1.1634	1.1634	1.1635	1.2012	0.00	0.01	3.25
67	1.7683	1.7684	1.7674	1.7592	0.01	0.05	0.51
68	2.4878	2.4878	2.489	2.4933	0.00	0.05	0.22

جدول ۱۲ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر XD/z به ازای داده‌های آزمون

No. Data	مقدار واقعی XD/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.7465	0.7514	0.7688	0.8813	0.66	2.99	18.06
2	1.0211	1.0297	1.0309	1.0414	0.84	0.96	1.99
3	1.2606	1.3122	1.3113	1.2692	4.10	4.02	0.69
4	1.4859	1.5192	1.4904	1.4458	2.24	0.30	2.70
5	1.6338	1.6908	1.641	1.6242	3.49	0.44	0.59
6	1.9859	2.077	2.0257	1.9369	4.59	2.00	2.47
7	2.1197	2.1206	2.1207	2.1262	0.04	0.05	0.31
8	2.4014	2.3644	2.3801	2.4917	1.54	0.89	3.76
9	1.5732	1.5543	1.7716	1.5629	1.20	12.61	0.65
10	2.1951	2.2245	2.1332	2.1191	1.34	2.82	3.46
11	2.6707	2.6916	2.6471	2.511	0.78	0.88	5.98
12	3.2317	3.2476	3.1869	3.168	0.49	1.39	1.97
13	3.561	3.5405	3.9361	3.5707	0.57	10.53	0.27
14	1.0986	1.1659	1.1414	1.0957	6.13	3.90	0.26
15	1.6761	1.8057	1.841	2.1848	7.74	9.84	30.35
16	0.9789	0.8927	0.8117	0.801	8.80	17.08	18.17
17	1.5352	1.4446	1.3789	1.4959	5.90	10.18	2.56
18	1.0366	1.0111	1.011	1.5512	2.46	2.47	49.65
19	1.8415	1.9028	1.99	1.8502	3.33	8.07	0.47
20	2.439	2.4815	2.4107	2.3345	1.74	1.16	4.29
21	3.1707	3.0348	2.9433	2.8033	4.29	7.17	11.59
22	1.0244	0.9995	-0.1314	1.0362	2.43	112.83	1.15
23	2.561	2.5368	2.9157	2.6049	0.94	13.85	1.72

جدول ۱۳ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادله (۳-۳۵) به ازای داده‌های تست برای متغیر XD/z

No. Data	مقدار واقعی XD/z	شبکه عصبی	معادله (۳-۳۵)	درصد خطا شبکه عصبی	درصد خطا معادله (۳-۳۵)
1	0.7183	0.7381	0.7276	2.76	1.29
2	1.007	1.0212	0.9997	1.41	0.73
3	1.2817	1.2818	1.2782	0.01	0.27
4	1.5141	1.4964	1.4824	1.17	2.09
5	1.7183	1.6758	1.682	2.47	2.11
6	1.7746	1.823	1.8611	2.72	4.87
7	2.1549	2.2425	2.1415	4.06	0.62
8	2.2676	2.214	2.305	2.36	1.65
9	1.561	1.5295	1.5457	2.02	0.98
10	2.0488	2.0211	1.9896	1.35	2.89
11	2.3171	2.3855	2.3072	2.95	0.43
12	2.9512	2.9777	2.8574	0.90	3.18
13	3.2317	3.3759	3.2079	4.46	0.74
14	0.7254	0.8386	0.8143	15.61	12.26
15	1.3662	1.4384	1.5078	5.28	10.36
16	0.8451	0.844	0.8247	0.13	2.41
17	1.2465	1.1627	1.1787	6.72	5.44
18	1.8028	1.6413	1.7576	8.96	2.51
19	1.5122	1.5771	1.6868	4.29	11.55
20	2.1829	2.253	2.3133	3.21	5.97
21	2.8537	2.8637	2.8692	0.35	0.54
22	3.2927	3.1874	3.2249	3.20	2.06
23	1.939	1.894	2.0401	2.32	5.21

جدول ۱۴ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های آموزش

No. Data	مقدار واقعی h_d/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.0423	0.0591	0.0425	0.0796	39.87	0.58	88.39
2	0.0423	0.0591	0.0437	0.0796	39.87	3.42	88.39
3	0.0845	0.0652	0.0853	0.0825	22.85	0.94	2.37
4	0.0986	0.0747	0.0958	0.085	24.23	2.83	13.79
5	0.1099	0.1056	0.106	0.1113	3.88	3.51	1.31
6	0.0986	0.1159	0.1136	0.1166	17.56	15.22	18.27
7	0.1127	0.1208	0.1147	0.118	7.21	1.80	4.72
8	0.1408	0.1485	0.1409	0.1456	5.43	0.04	3.38
9	0.1338	0.155	0.1441	0.1496	15.84	7.70	11.81
10	0.1761	0.1862	0.185	0.1755	5.76	5.08	0.32
11	0.169	0.1828	0.1876	0.1782	8.16	11.00	5.44
12	0.2254	0.2169	0.2156	0.2076	3.75	4.33	7.88
13	0.2254	0.2155	0.2162	0.208	4.37	4.06	7.70
14	0.2141	0.2109	0.2193	0.2102	1.49	2.44	1.81
15	0.2324	0.2411	0.237	0.2403	3.75	1.98	3.40
16	0.2394	0.2408	0.2371	0.2404	0.57	0.98	0.40
17	0.2254	0.2344	0.2425	0.2431	4.02	7.61	7.88
18	0.2606	0.2637	0.2606	0.273	1.20	0.01	4.77
19	0.2465	0.2593	0.2653	0.2748	5.20	7.64	11.49
20	0.2958	0.2924	0.287	0.3043	1.14	2.97	2.88
21	0.2535	0.2878	0.2929	0.3061	13.52	15.53	20.74
22	0.338	0.3265	0.3207	0.3362	3.41	5.13	0.54
23	0.3521	0.3696	0.3605	0.368	4.97	2.38	4.51
24	0.1098	0.0946	0.1022	0.1041	13.81	6.88	5.15
25	0.1341	0.1309	0.1218	0.1248	2.42	9.20	6.97
26	0.1829	0.1661	0.1606	0.1586	9.20	12.21	13.30
27	0.1829	0.194	0.1828	0.1792	6.05	0.07	2.04
28	0.2439	0.2203	0.2208	0.2146	9.68	9.47	12.01
29	0.2317	0.2157	0.2317	0.2211	6.91	0.00	4.58
30	0.2683	0.2463	0.2558	0.234	8.20	4.66	12.78
31	0.2317	0.2324	0.2294	0.2436	0.30	1.00	5.13
32	0.2805	0.2985	0.3036	0.287	6.42	8.24	2.32
33	0.3537	0.3095	0.3196	0.3282	12.49	9.63	7.20
34	0.378	0.3713	0.3625	0.3409	1.79	4.11	9.83
35	0.4146	0.4241	0.4231	0.3914	2.28	2.04	5.60
36	0.4878	0.4815	0.4839	0.4425	1.29	0.80	9.29
37	0.5366	0.5397	0.5395	0.4941	0.58	0.54	7.92

ادامه جدول ۱۴

No. Data	مقدار واقعی h_d/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
38	0.5732	0.5562	0.5732	0.5524	2.96	0.34	3.62
39	0.5732	0.5737	0.5732	0.607	0.09	0.20	5.90
40	0.5488	0.5623	0.5488	0.6089	2.46	0.62	10.96
41	0.0634	0.0604	0.0634	0.0309	4.70	2.87	51.25
42	0.1056	0.1012	0.1056	0.0938	4.20	5.46	11.20
43	0.162	0.1629	0.162	0.1537	0.57	2.14	5.11
44	0.1831	0.2004	0.1831	0.217	9.45	6.01	18.52
45	0.1831	0.1809	0.1831	0.2194	1.20	2.35	19.83
46	0.0352	0.0347	0.0352	0.0267	1.45	24.11	24.17
47	0.0493	0.0479	0.0493	0.0284	2.83	13.79	42.39
48	0.0493	0.0543	0.0493	0.0295	10.15	6.89	40.16
49	0.0634	0.0646	0.0634	0.0351	1.92	5.24	44.62
50	0.0986	0.0984	0.0986	0.0948	0.19	4.17	3.85
51	0.1549	0.1585	0.1549	0.1542	2.30	0.60	0.47
52	0.2183	0.2003	0.2183	0.217	8.25	11.14	0.60
53	0.2324	0.2334	0.2324	0.2809	0.43	6.37	20.87
54	0.0976	0.0971	0.0976	0.1308	0.47	1.09	34.07
55	0.1341	0.1329	0.1341	0.1653	0.93	0.34	23.22
56	0.122	0.1273	0.122	0.1853	4.39	1.93	51.95
57	0.1951	0.1895	0.1951	0.2183	2.88	3.75	11.88
58	0.2561	0.253	0.2561	0.2475	1.21	0.04	3.36
59	0.3049	0.3071	0.3049	0.2699	0.73	0.86	11.47
60	0.3659	0.3657	0.3659	0.3044	0.04	1.46	16.80
61	0.4024	0.401	0.4024	0.3406	0.36	0.09	15.37
62	0.3537	0.3586	0.3537	0.3472	1.40	3.18	1.83
63	0.378	0.3781	0.378	0.3828	0.01	1.23	1.26
64	0.4024	0.4064	0.4024	0.4172	0.98	1.88	3.67
65	0.4634	0.4591	0.4634	0.4491	0.93	4.69	3.09
66	0.0854	0.0854	0.0854	0.0914	0.04	0.08	7.07
67	0.1951	0.1952	0.1951	0.2169	0.04	0.04	11.16
68	0.3659	0.3657	0.3659	0.3552	0.04	0.01	2.91

جدول ۱۵ مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی با ۶ نرون در لایه پنهان با توابع محرک متفاوت برای متغیر h_d/z به ازای داده‌های آزمون

No. Data	مقدار واقعی h_d/z	تابع سیگموئید	تابع تانژانت هیپربولیک	تابع خطی	درصد خطای سیگموئید	درصد خطای تانژانت هیپربولیک	درصد خطای تابع خطی
1	0.0775	0.0656	0.0861	0.0826	15.32	11.15	6.63
2	0.0915	0.1069	0.1096	0.1129	16.77	19.72	23.32
3	0.1127	0.152	0.143	0.1483	34.90	26.91	31.62
4	0.1549	0.1831	0.1895	0.1799	18.18	22.31	16.12
5	0.2042	0.2098	0.2214	0.2116	2.73	8.41	3.61
6	0.2676	0.268	0.2578	0.2719	0.15	3.66	1.60
7	0.2887	0.2924	0.287	0.3043	1.27	0.60	5.39
8	0.3169	0.3687	0.3627	0.3685	16.35	14.45	16.28
9	0.1707	0.1652	0.1617	0.1598	3.24	5.29	6.40
10	0.2317	0.2435	0.2541	0.2328	5.09	9.66	0.47
11	0.3659	0.3112	0.3121	0.3262	14.94	14.69	10.84
12	0.4756	0.4774	0.4718	0.439	0.38	0.80	7.70
13	0.5122	0.5278	0.532	0.5007	3.05	3.87	2.24
14	0.0986	0.1116	0.1227	0.0909	13.19	24.45	7.80
15	0.2042	0.225	0.2445	0.2826	10.17	19.72	38.38
16	0.0704	0.0633	0.08	0.0318	10.11	13.60	54.84
17	0.1549	0.1318	0.1258	0.1574	14.93	18.80	1.59
18	0.0854	0.0717	0.0767	0.1501	16.01	10.15	75.83
19	0.2683	0.2427	0.2192	0.2355	9.54	18.30	12.22
20	0.3293	0.329	0.3343	0.3131	0.08	1.53	4.91
21	0.4878	0.4581	0.4537	0.4109	6.09	6.99	15.77
22	0.0732	0.0804	-0.0437	0.0795	9.88	159.72	8.65
23	0.2561	0.3109	0.4181	0.3633	21.40	63.26	41.86

جدول ۱۶ مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبکه عصبی و معادله (۳-۳۶) به ازای داده‌های تست برای متغیر h_d/z

No. Data	مقدار واقعی h_d/z	شبکه عصبی	معادله (۳-۳۶)	درصد خطا شبکه عصبی	درصد خطا معادله (۳-۳۶)
1	0.0704	0.0623	0.0593	11.53	15.78
2	0.0915	0.1056	0.0957	15.35	4.52
3	0.1197	0.1482	0.1384	23.79	15.60
4	0.162	0.1849	0.1729	14.16	6.77
5	0.2113	0.2136	0.2091	1.10	1.03
6	0.1901	0.2381	0.2434	25.22	28.03
7	0.2958	0.2975	0.3007	0.58	1.65
8	0.3239	0.3252	0.3358	0.39	3.65
9	0.1829	0.1669	0.151	8.76	17.46
10	0.2195	0.2151	0.2205	2.01	0.47
11	0.3171	0.2584	0.2755	18.50	13.10
12	0.439	0.3873	0.38	11.78	13.44
13	0.4756	0.5011	0.452	5.36	4.96
14	0.0423	0.0372	0.0553	11.96	30.90
15	0.1479	0.1385	0.1396	6.35	5.63
16	0.0423	0.0411	0.0564	2.73	33.39
17	0.0986	0.1127	0.0964	14.31	2.19
18	0.2042	0.1722	0.1757	15.68	13.95
19	0.2195	0.1833	0.1973	16.50	10.10
20	0.2561	0.2929	0.317	14.37	23.80
21	0.4268	0.4248	0.4385	0.48	2.73
22	0.5244	0.4863	0.5227	7.26	0.32
23	0.2073	0.2359	0.2065	13.79	0.37

مراجع

۴- فهرست مراجع

[1]. "National Engineering Handbook, Part 654, Technical Supplement 14G, Grade Stabilization Techniques", pp. 1-28, 2007.

[۲]. ژولین، پیر. "مکانیک رودخانه"، ترجمه دکتر محمدرضا جعفرزاده، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷.

[۳]. یانگ، چی تد. "انتقال رسوب"، ترجمه سید امیر امامی، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۹.

[۴]. شفاعی بجستان، محمود. "هیدرولیک رسوب"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۴.

[5]. Garcia, M.H. "Hydraulic design handbook, Chapter 6: Sedimentation and erosion hydraulics", McGraw-Hill, 2004.

[۶]. جعفرزاده، محمدرضا. "جزوه کلاسی درس مهندسی رودخانه"، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷.

[7]. Hoffmans, G.J.C.M, and Verheij, H.J. "Scour manual", Balkema, Rotterdam, 1997.

[8]. D'Agostino, V., and Ferro, V. "Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures", J. Hydraul. Eng, Vol. 130(1), 24-36, 2004.

[9]. Mason, P.J., and Arumugam, K. "Free jet scour below dams and flip buckets", J. Hydraul. Eng, Vol. 111(2), 220-235, 1985.

[10]. Bormann, N.E., and Julien, P.Y. "Scour downstream of grade-control structures", *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 117(5), 579-594, 1991.

[۱۱]. منہاج، محمدباقر. "مبانی شبکه‌های عصبی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱.

[۱۲]. راسل، بیل. "آشنایی با شبکه‌های عصبی"، ترجمه محمود البرزی، چاپ دوم انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.

[13]. *Neural Network Toolbox User's Guide. "MATLAB USER MANUAL", MATH WORKS Inc 1992-2000.*

[۱۴]. پیکتن، فیلیپ. "شبکه‌های عصبی"، ترجمه دکتر میرمجتبی میرصالحی و دکتر حسین تقی زاده کاخکی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷.

[15]. Tavakoly zadeh, A.A., and Kashefipour, S.M. "Modeling local scour on loose bed downstream of grade-control structures using artificial neural network", *J. Applied Sciences*, Vol. 8(11), 2067-2074, 2008.