

## پیش بینی دبی روزانه جریان باراندوزچای با استفاده از تئوری آشوب

احمد پورمحمد اقدم<sup>1</sup>، ادريس معروفی نیا<sup>2\*</sup> و ابوالفضل شمساىی<sup>3</sup>

(1) کارشناس ارشد عمران آب، گروه عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، ایران.

(2) دانشجوی دکترا، گروه عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

(3) استاد، گروه عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول مکاتبات: edris.marufynia@yahoo.com

تاریخ پذیرش: 91/9/28

تاریخ دریافت: 91/7/15

## چکیده:

بررسی رفتار جریان رودخانه یکی از موارد اساسی در طراحی، بهره برداری و مطالعات مربوط به مهندسی آب است. از این رو بکارگیری روش های نوین همچون نظریه آشوب در هیدرولوژی و منابع آب به دلیل نوآوری و قابلیت های آن، اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده است. یکی از کاربردهای نظریه آشوب، تعیین خصوصیات کمی و آنالیز سری های زمانی هیدرولوژیکی همچون جریان رودخانه است. به منظور بازسازی فضای حالت، زمان تاخیر از روش تابع خود همبستگی و بعد محاط از الگوریتم نزدیکترین همسایگی کاذب محاسبه گردید. روش بعد همبستگی نیز برای بررسی آشوب پذیری جریان روزانه بکار گرفته شد، که بعد همبستگی حاصله حاکی از وجود رفتار آشوبناک سری زمانی تحت بررسی می باشد. زمان تأخیر از روش میانگین اطلاعات متقابل برای باراندوزچای برابر 66 به دست آمد. با استفاده از روش نزدیک ترین همسایگی کاذب مناسب ترین بعد محاط برابر 28 تعیین شد. بعد همبستگی برای سری زمانی دبی جریان برابر 3/1 بوده یعنی تعداد متغیرهای لازم برای تشریح سیستم برابر 3 است. مقدار کم بعد همبستگی (d) به دست آمده در مقیاس زمانی روزانه نشان دهنده وجود آشوب در سری زمانی دبی جریان رودخانه باراندوزچای می باشد.

واژه های کلیدی: بعد همبستگی، زمان تأخیر، نظریه آشوب، باراندوز چای.

## مقدمه

بررسی مولفه‌های موثر در تحلیل سامانه‌های منابع آب از جمله بررسی رفتار جریان رودخانه یکی از موارد اساسی در طراحی، بهره‌برداری و مطالعات مرتبط به این منابع به شمار می‌رود. در اغلب رودخانه‌های طبیعی بخش اعظم رسوبات به صورت بار معلق انتقال می‌یابند. رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها مشکلات زیادی از جمله رسوبگذاری در مخازن سدها و کاهش حجم مفید آنها، تغییر مسیر رودخانه به دلیل رسوب گذاری در بستر آنها، کاهش ظرفیت عبور کانال‌ها و تاسیسات انتقال آب و تغییر کیفیت آب به لحاظ مصارف شرب و کشاورزی را به وجود می‌آورند (احمدی 1387). آشوب (Chaos) در لغت به معنی هرج و مرج، درهم ریختگی، شلوغی، آشفتگی و بی‌نظمی آمده است. نظریه آشوب برای اولین بار در سال 1965 توسط ادوارد لورنز در هواشناسی به کار برده شد. تئوری آشوب به مطالعه سیستم‌هایی می‌پردازد که در نگاه اول به نظر می‌رسد رفتار تصادفی داشته باشد اما در واقع همین سیستم تحت حاکمیت قوانین مشخصی است. چنین سیستمی به شرایط اولیه بسیار حساس است بگونه‌ای ورودی‌های ظاهراً ناچیز و دلخواه قادرند تأثیرات شگرفی بر روی آن داشته باشند. به چنین سیستم‌هایی آشوبناک گفته می‌شود. انگاره اصلی تئوری آشوب این است که در هر بی‌نظمی، نظمی نهفته است. بدین معنا که نباید نظم را در یک مقیاس جستجو کرد.

قربانی و همکاران (2011) با مطالعه سری داده‌های رسوب معلق روزانه رودخانه ليقوان در مدت 21 سال آماری، با استفاده از تئوری آشوب مقدار زمان تأخیر را 62 روز محاسبه و براساس زمان تأخیر بدست آمده و به ازای، بعد محاط 34، بعد هبستگی 1/6 حاصل گردیده است، که این مقدار دلالت بر آشوب پذیر بودن میزان رسوب روزانه رودخانه ليقوان دارد.

فرزین و همکاران (1390) با مطالعه سری زمانی بارش در دریاچه ارومیه در طول دوره آماری 40 سال اخیر با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب بعد هبستگی را 2/56 به دست آوردند که مقدار غیرصحیح این کمیت، حاکی از رفتار آشوبناک سری زمانی بارش در دریاچه ارومیه می‌باشد.

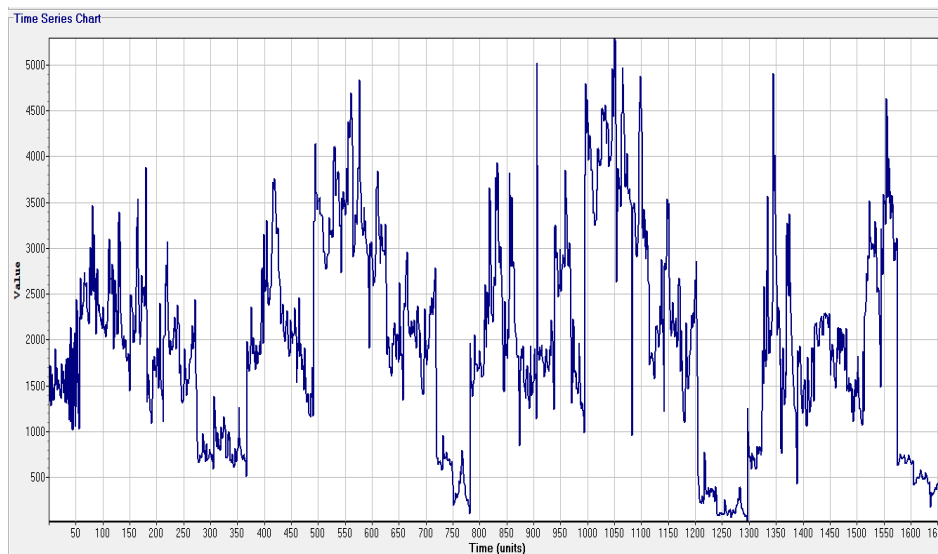
ریگوندا و همکاران (2004) داده‌های جریان سه رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف روزانه، پنج روزه و هفت روزه را از نظر آشوب پذیری مورد بحث و بررسی قرار دادند. تعدادی از سری داده‌ها رفتار آشوبناک و بررسی رفتار تصادفی نشان دادند.

سیواکومار (2001) جهت بررسی دینامیک بارش در مقیاس‌های مختلف زمانی، مطالعه‌ای را با نظریه آشوب انجام داد. بدین منظور داده‌های بارش در 4 مقیاس زمانی روزانه، 2 روزه، 4 روزه و 8 روزه طی 25 سال در حوضه رودخانه لیف در می‌سی‌سی‌پی تجزیه و تحلیل شدند و جهت نشان دادن رفتار دینامیکی بارش از روش بُعد هبستگی استفاده گردید. بُعد هبستگی محدود برای هر 4 مقیاس به ترتیب 82/4، 84/42.8/26.6/5، بدست آمد که امکان وجود رفتار آشوبی در هر 4 مقیاس را نشان می‌دهد.

وَنگ و همکاران (2007) کاربرد تکنیک‌های تحلیلی آشوبناک را بر روی سری‌های جریان نویزدار روزانه بررسی کردند. آنها در این تحقیق تأثیر نامنظمی را در پیچیدگی یک سیستم به لحاظ کمی و بصورت بصری با استفاده از مفهوم آشوب بررسی نموده و نشان دادند که وجود نامنظمی باعث افزایش پیچیدگی تحلیل سری‌های زمانی شده است.

خان و همکاران (2005) امکان وجود سیگنالهای آشوبی از سری های زمانی محدود به دست آمده در سیستم های هیدرولوژیکی را بررسی نمودند. در این تحقیق مقادیر دبی روزانه در طول 4 سال از رودخانه آرکانزاس و کلرادو بررسی شدند که هیچ یک از سری های زمانی خام وجود آشوب را نشان ندادند. این تحقیق نشان می دهد که داده های هیدرولوژیکی هم می تواند و هم نمی تواند پدیده آشوب معینی داشته باشد.

از جمله تحقیقات مشابه می توان شانگ و همکاران (2009)، کوچاک و همکاران (2007)، استهلیک (2003)، سولوماتین و همکاران (2001)، سیواکومار و همکاران (1999)، لیزی و ویلی (2002)، داملا و یالچین (2007) اشاره نمود. اهداف تحقیق شامل تعیین آشوب پذیری داده های دبی در مقیاس زمانی روزانه، مدل سازی جریان با استفاده از تئوری آشوب، پیش بینی میزان دبی جریان با تئوری آشوب می باشد. در این مقاله به بررسی آشوبناکی رفتار جریان رودخانه و سپس با استفاده از نظریه آشوب به تخمین جریان رودخانه پرداخته شده است.



شکل 1: نمودار سری زمانی دبی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای

## مواد و روش ها

### بازسازی فضای حالت

مفهوم فضای حالت، ابزاری سودمند برای مطالعه سیستم های دینامیک می باشد. مطابق این مفهوم، یک سیستم دینامیک می تواند توسط یک نمودار فضای حالت توصیف شود. این سیستم شامل یک مختصات با متغیر-هایی هستند که در فرمول ریاضی آن وجود دارد و متغیر-ها نشان دهنده وضعیت سیستم در هر لحظه خاص می باشند. تکنیک متداولی که توسط تاکن ارائه شده از روش تأخیر برای نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای  $d_e$  بعدی استفاده می کند (عطائی، 1384). روش تاکن به بیان ساده به این صورت است که

یک شبکه‌ای به طول  $m$  از روی سری زمانی عبور داده می‌شود و به این ترتیب یک ماتریس با تعداد سطرهای برابر  $m$  تشکیل می‌یابد، برای سری زمانی:

$$x(t) = (x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_t, \dots) \quad (1)$$

ماتریس برای بازسازی خط سیر اینگونه است:

$$X = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_{m-1} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_m \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_{m+1} \\ \vdots & & & & \end{pmatrix} \quad (2)$$

تاکن نشان داده است که چنین ماتریسی کلیه ویژگی‌های هندسی سیستم دینامیکی اولیه را بدون اینکه با خودش برخوردی داشته باشد بیان می‌کند. انتخاب هوشیارانه تاخیرها (تغییر پریود نمونه برداری مقادیر متوالی  $x_t$ ) با تاثیر بر وسعت جاذب نتیجه را بهتر می‌کند برای سری‌های زمانی اسکالر که  $t = 1, 2, 3, \dots$  فضای حالت می‌تواند با استفاده از تاخیرها ایجاد شود. ایده اساسی درباره نحوه انتخاب زمان تاخیر آن است که ارزیابی هر متغیر مجزای سیستم توسط متغیرهای دیگر سیستم تعیین می‌شود که دارای اثر متقابل می‌باشند. بنابراین اطلاعات هر متغیر وابسته در تاریخچه هر متغیر مستقل دیگر سیستم وجود خواهد داشت. بر اساس یک چنین معادل‌سازی، فضای حالت می‌تواند با استفاده از المان  $x_t$  سری‌های زمانی ایجاد شود و تأخیر آن مطابق با سری‌های زمانی جدید خواهد بود.

$$Y_t = \{x_t, x_{t-\tau}, x_{t-2\tau}, \dots, x_{t-(m-1)\tau}\} \quad (3)$$

که در آن  $\tau$ ، نشان دهنده زمان تاخیر بوده و در سری‌های زمانی عددی، حاصلضرب زمان نمونه برداری می‌باشد  $m$ ، اندازه محاط شده را نشان می‌دهد (کنل و همکاران، 1992). انتخاب زمان تاخیر مناسب در تحلیل‌های بعدی کاملاً موثر است و انتخاب دلخواه آن، برای استخراج دینامیک داده‌ها مناسب نیست. اگر زمان تأخیر در مقایسه با مقیاس‌های زمانی مربوط به ذات سیستم بسیار کوچک انتخاب گردد، مؤلفه‌های متوالی در برابر تاخیر به شدت به هم نزدیک و وابسته می‌باشند. بنابراین، تمام بردارهای تاخیر در فضای محاط  $m$  بعدی در حوالی محور قطری فضا متمرکز می‌گردند. این پدیده تحت عنوان افزودگی نامیده شده است. از طرف دیگر، اگر زمان تاخیر  $\tau$  بسیار بزرگ انتخاب گردد، مؤلفه‌های متفاوت کاملاً ناهمبسته می‌گردند. در این حالت جاذب بازسازی شده ممکن است بسیار پیچیده گردد حتی اگر جاذب واقعی سیستم ساده باشد (پری زنگنه، 1388). فراسر و سوینی (1986) بمنظور تعیین زمان تأخیر مناسب، استفاده از تابع میانگین اطلاعات متقابل (AMI) بین داده‌های سری زمانی را پیشنهاد کردند. اطلاعات متقابل بین اندازه

$y(t)$  و اندازه  $y(t + \tau)$  عبارت است از میزان فراگیری در مورد اندازه گیری  $y(t + \tau)$  با استفاده از اندازه گیری  $y(t)$  تابع میانگین اطلاعات متقابل بصورت زیر تعریف می شود:

$$I(\tau) = \sum P(x(t), x(t + \tau)) \cdot \log_2 \left[ \frac{P(x(t), x(t + \tau))}{P(x(t)) \cdot P(x(t + \tau))} \right] \quad (4)$$

به منظور محاسبه میانگین اطلاعات متقابل  $I(\tau)$  لازم است که احتمال های مجزا  $p(y(t))$  و  $p(y(t + \tau))$  موجود در رابطه بالا تخمین زده شود و برای محاسبه آنها هیستوگرام مربوط به  $y(t)$  و  $y(t + \tau)$  در نظر گرفته می شود و برای محاسبه احتمال مشترک  $p(y(t), y(t + \tau))$  از هیستوگرام بردار  $(y(t), y(t + \tau))$  استفاده می شود. فراسر و سوینی اولین مینیمم تابع میانگین اطلاعات متقابل را بعنوان زمان تاخیر مناسب معرفی کردند. متداول ترین روش تعیین بعد محاط بهینه ( $m$ ) از سری های زمانی آشوبی، روش شمارش نزدیک ترین همسایه های کاذب می باشد. در این روش بررسی می گردد که چه موقع انقطاع کاذب در مسیر های حالت، که از تصویر نمودن جاذب در یک فضا با بعد پایین ناشی شده است، متوقف می گردد. در این روش ابتدا با در نظر گرفتن مولفه برای هر بردار تاخیر، می توان بردارهای تاخیر  $Y_i(t)$  را مطابق رابطه (5) در فضای محاط تشکیل داد.

$$Y_i(t) = [y(t), y(t - \tau), \dots, y(t - (m - 1)\tau)]^T \quad (5)$$

$r$  امین همسایه هر بردار تاخیر  $Y_i(t)$  به شکل زیر می باشد:

$$Y_r^{NN}(t) = [y(t_r), y(t_r - \tau), \dots, y(t_r - (m - 1)\tau)]^T \quad (6)$$

که در آن 5، 2، 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9، 10، 11، 12، 13، 14، 15، 16، 17، 18، 19، 20، 21، 22، 23، 24، 25، 26، 27، 28، 29، 30، 31، 32، 33، 34، 35، 36، 37، 38، 39، 40، 41، 42، 43، 44، 45، 46، 47، 48، 49، 50، 51، 52، 53، 54، 55، 56، 57، 58، 59، 60، 61، 62، 63، 64، 65، 66، 67، 68، 69، 70، 71، 72، 73، 74، 75، 76، 77، 78، 79، 80، 81، 82، 83، 84، 85، 86، 87، 88، 89، 90، 91، 92، 93، 94، 95، 96، 97، 98، 99، 100، 101، 102، 103، 104، 105، 106، 107، 108، 109، 110، 111، 112، 113، 114، 115، 116، 117، 118، 119، 120، 121، 122، 123، 124، 125، 126، 127، 128، 129، 130، 131، 132، 133، 134، 135، 136، 137، 138، 139، 140، 141، 142، 143، 144، 145، 146، 147، 148، 149، 150، 151، 152، 153، 154، 155، 156، 157، 158، 159، 160، 161، 162، 163، 164، 165، 166، 167، 168، 169، 170، 171، 172، 173، 174، 175، 176، 177، 178، 179، 180، 181، 182، 183، 184، 185، 186، 187، 188، 189، 190، 191، 192، 193، 194، 195، 196، 197، 198، 199، 200، 201، 202، 203، 204، 205، 206، 207، 208، 209، 210، 211، 212، 213، 214، 215، 216، 217، 218، 219، 220، 221، 222، 223، 224، 225، 226، 227، 228، 229، 230، 231، 232، 233، 234، 235، 236، 237، 238، 239، 240، 241، 242، 243، 244، 245، 246، 247، 248، 249، 250، 251، 252، 253، 254، 255، 256، 257، 258، 259، 260، 261، 262، 263، 264، 265، 266، 267، 268، 269، 270، 271، 272، 273، 274، 275، 276، 277، 278، 279، 280، 281، 282، 283، 284، 285، 286، 287، 288، 289، 290، 291، 292، 293، 294، 295، 296، 297، 298، 299، 300، 301، 302، 303، 304، 305، 306، 307، 308، 309، 310، 311، 312، 313، 314، 315، 316، 317، 318، 319، 320، 321، 322، 323، 324، 325، 326، 327، 328، 329، 330، 331، 332، 333، 334، 335، 336، 337، 338، 339، 340، 341، 342، 343، 344، 345، 346، 347، 348، 349، 350، 351، 352، 353، 354، 355، 356، 357، 358، 359، 360، 361، 362، 363، 364، 365، 366، 367، 368، 369، 370، 371، 372، 373، 374، 375، 376، 377، 378، 379، 380، 381، 382، 383، 384، 385، 386، 387، 388، 389، 390، 391، 392، 393، 394، 395، 396، 397، 398، 399، 400، 401، 402، 403، 404، 405، 406، 407، 408، 409، 410، 411، 412، 413، 414، 415، 416، 417، 418، 419، 420، 421، 422، 423، 424، 425، 426، 427، 428، 429، 430، 431، 432، 433، 434، 435، 436، 437، 438، 439، 440، 441، 442، 443، 444، 445، 446، 447، 448، 449، 450، 451، 452، 453، 454، 455، 456، 457، 458، 459، 460، 461، 462، 463، 464، 465، 466، 467، 468، 469، 470، 471، 472، 473، 474، 475، 476، 477، 478، 479، 480، 481، 482، 483، 484، 485، 486، 487، 488، 489، 490، 491، 492، 493، 494، 495، 496، 497، 498، 499، 500، 501، 502، 503، 504، 505، 506، 507، 508، 509، 510، 511، 512، 513، 514، 515، 516، 517، 518، 519، 520، 521، 522، 523، 524، 525، 526، 527، 528، 529، 530، 531، 532، 533، 534، 535، 536، 537، 538، 539، 540، 541، 542، 543، 544، 545، 546، 547، 548، 549، 550، 551، 552، 553، 554، 555، 556، 557، 558، 559، 560، 561، 562، 563، 564، 565، 566، 567، 568، 569، 570، 571، 572، 573، 574، 575، 576، 577، 578، 579، 580، 581، 582، 583، 584، 585، 586، 587، 588، 589، 590، 591، 592، 593، 594، 595، 596، 597، 598، 599، 600، 601، 602، 603، 604، 605، 606، 607، 608، 609، 610، 611، 612، 613، 614، 615، 616، 617، 618، 619، 620، 621، 622، 623، 624، 625، 626، 627، 628، 629، 630، 631، 632، 633، 634، 635، 636، 637، 638، 639، 640، 641، 642، 643، 644، 645، 646، 647، 648، 649، 650، 651، 652، 653، 654، 655، 656، 657، 658، 659، 660، 661، 662، 663، 664، 665، 666، 667، 668، 669، 670، 671، 672، 673، 674، 675، 676، 677، 678، 679، 680، 681، 682، 683، 684، 685، 686، 687، 688، 689، 690، 691، 692، 693، 694، 695، 696، 697، 698، 699، 700، 701، 702، 703، 704، 705، 706، 707، 708، 709، 710، 711، 712، 713، 714، 715، 716، 717، 718، 719، 720، 721، 722، 723، 724، 725، 726، 727، 728، 729، 730، 731، 732، 733، 734، 735، 736، 737، 738، 739، 740، 741، 742، 743، 744، 745، 746، 747، 748، 749، 750، 751، 752، 753، 754، 755، 756، 757، 758، 759، 760، 761، 762، 763، 764، 765، 766، 767، 768، 769، 770، 771، 772، 773، 774، 775، 776، 777، 778، 779، 780، 781، 782، 783، 784، 785، 786، 787، 788، 789، 790، 791، 792، 793، 794، 795، 796، 797، 798، 799، 800، 801، 802، 803، 804، 805، 806، 807، 808، 809، 810، 811، 812، 813، 814، 815، 816، 817، 818، 819، 820، 821، 822، 823، 824، 825، 826، 827، 828، 829، 830، 831، 832، 833، 834، 835، 836، 837، 838، 839، 840، 841، 842، 843، 844، 845، 846، 847، 848، 849، 850، 851، 852، 853، 854، 855، 856، 857، 858، 859، 860، 861، 862، 863، 864، 865، 866، 867، 868، 869، 870، 871، 872، 873، 874، 875، 876، 877، 878، 879، 880، 881، 882، 883، 884، 885، 886، 887، 888، 889، 890، 891، 892، 893، 894، 895، 896، 897، 898، 899، 900، 901، 902، 903، 904، 905، 906، 907، 908، 909، 910، 911، 912، 913، 914، 915، 916، 917، 918، 919، 920، 921، 922، 923، 924، 925، 926، 927، 928، 929، 930، 931، 932، 933، 934، 935، 936، 937، 938، 939، 940، 941، 942، 943، 944، 945، 946، 947، 948، 949، 950، 951، 952، 953، 954، 955، 956، 957، 958، 959، 960، 961، 962، 963، 964، 965، 966، 967، 968، 969، 970، 971، 972، 973، 974، 975، 976، 977، 978، 979، 980، 981، 982، 983، 984، 985، 986، 987، 988، 989، 990، 991، 992، 993، 994، 995، 996، 997، 998، 999، 1000

$$R_m^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [y(t - i\tau) - y(t_r - i\tau)]^2 \quad (7)$$

اگر بردار  $Y_r^{NN}(t)$  یک همسایه واقعی برای بردار  $Y_i(t)$  باشد، این همسایگی نشأت گرفته از ماهیت دینامیکی سیستم است ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر از یک فضای با بعد بالاتر به فضایی با بعد پایین صورت گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بعد  $m$  به  $m + 1$ ، این همسایه های کاذب از همسایگی بردار  $Y_i(t)$  خارج می گردند. با افزایش بعد  $m$  به  $m + 1$ ، مولفه های اضافه شده به بردار های تاخیر  $Y_i(t)$  و  $Y_r^{NN}(t)$ ، به ترتیب  $y(t - m\tau)$  و  $y(t_r - m\tau)$  خواهند بود بنابراین فاصله بین دو بردار بر اساس نرم اقلیدسی در فضای  $m + 1$  بعدی بطور مشابه به صورت زیر است:

$$R_{m+1}^2 = R_m^2 + [y(t - m\tau) - y(t_r - m\tau)]^2 \quad (8)$$

بنابراین، فاصله اضافه شده در فضای  $m + 1$  بعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای  $m$  بعدی بصورت زیر خواهیم داشت:

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{|y(t - m\tau) - y(t_r - m\tau)|}{R_m} \quad (9)$$

هرگاه کمیت فوق الذکر از یک مقدار آستانه (حدود 10-15) فراتر برود، همسایه تحت بررسی، کاذب در نظر گرفته می شود.

### بعد همبستگی

بعد همبستگی یکی از روش های مرسوم جهت تعیین آشوبناکی سیستم و همچنین بعد آشوبی می باشد. برای فضای حالت  $m$  بعدی،

تابع همبستگی  $C(r)$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq N} H(r - |Y_i - Y_j|) \quad (10)$$

که در آن  $H$ ، یک تابع هویساید پله ای با  $H(u) = 1$  بر  $u \geq 0$  و  $H(u) = 0$  بر  $u \leq 0$  بوده و  $N$ ،  $u = r - |Y_i - Y_j|$

تعداد نقاط در فضای مزبور، شعاع کره ساخته شده به مرکز  $Y_i$  یا  $Y_j$  می باشد. برای مقادیر مثبت  $r$ ، تابع همبستگی  $C(r)$  با رابطه زیر به  $r$  مرتبط می شود:

$$C(r) \underset{\substack{r \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}}{\approx} ar^{D_2} \quad (11)$$

که در این رابطه  $a$ ، یک ضریب ثابت بوده و  $D_2$  توان همبستگی می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$D_2 = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (12)$$

از آنجایی که مجموعه داده ها پیوسته نخواهد بود، نمی تواند مقادیر نزدیک به صفر داشته باشد، در نتیجه  $\log C(r)$  بر  $\log(r)$  تقسیم شده و از آن حد گرفته می شود و سپس قسمت خطی نمودار حاصل از آن انتخاب می شود. در نتیجه این کار، مقدار  $D_2$  حاصل می شود. با استفاده از رسم  $D_2$  در مقابل  $m$  برای فرایندهای تصادفی،  $D_2$  بدون رسیدن به یک مقدار اشباع با افزایش  $m$  تغییر می کند در حالیکه برای فرایندهای قطعی مقدار  $D_2$  بعد از یک  $m$  معین اشباع می گردد. مقدار اشباع، بعد فرکتالی (بعد همبستگی) جاذب یا سری زمانی است (سیمونویک، 2002).

## پیش بینی موضعی

همان طور که گفته شد، با در نظر گرفتن سری های زمانی تک متغیره، می توان فضای حالت را بوجود آورد. فرض می شود که سری های زمانی از یک سیستم دینامیک دارای رفتار بی نظم با بعد  $m$  در فضای حالت تشکیل شده اند، برای این سری های زمانی خواهیم داشت:

$$x_i \in R, i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

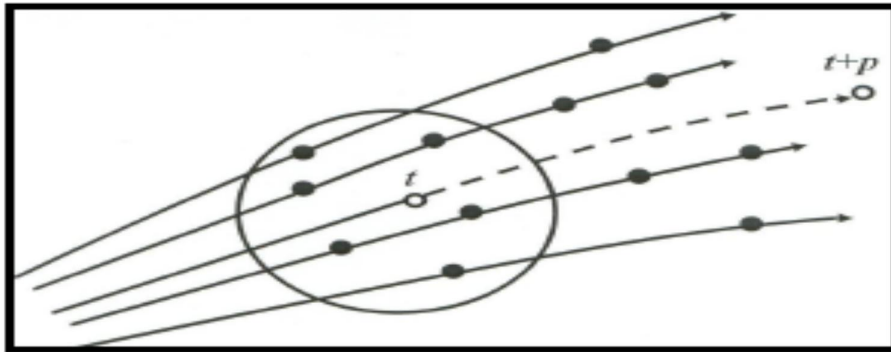
$$X_i = (x_i, x_{i-\tau}, \dots, x_{i-(m-1)\tau}) \in R^m \quad (14)$$

$$i = 1 + (m-1)\tau, 2 + (m-1)\tau, \dots, N-1, N \quad (15)$$

$X_i$  بردار  $M$  بعدی از مقادیر  $x_i, x_{i-\tau}, x_{i-2\tau}, \dots, x_{i-(m-1)\tau}$  می باشد. چنین روندی بیانگر ساختار فضای حالت با توجه به مشخصات جاذب می باشد. در چنین فضای  $M$  بعدی، پیش بینی با تقریب تغییر  $X_i$  با زمان صورت می گیرد. با در نظر گرفتن ارتباط میان نقاط  $X_{t+p}$  و  $X_t$  در زمان  $P$ ، جاذب توسط تابع  $F$  بصورت زیر تقریب زده می شود

$$X_{t+p} \cong F(X_t) \quad (16)$$

مکانیزم تقریب موضعی و مدل آن در شکل (1) نشان داده شده است. در این روش پیش بینی، تغییر  $X_t$  با زمان در جاذب، فرض می شود که با نقاط نزدیک آنها یکسان باشد. در اینجا  $X_{t+p}$  توسط ترتیب  $d$  ام از تابع چند گانه  $F(X_t)$  تعیین می شود (کوچاک، 2007).



شکل 2: مکانیزم پیش بینی موضعی و مدل آن

تخمین موضعی فرایند با رابطه (17) انجام می پذیرد که  $X_{t+p}$  بوسیله چند جمله ای مرتبه  $d$  قابل تعیین است:

$$\begin{aligned}
x_{t+p} \cong & f_0 + \sum_{k_1=0}^{m-1} f_{1k_1} X_{t-k_1\tau} + \\
& \sum_{\substack{k_2=k_1 \\ k_1=0}}^{m-1} f_{2k_1k_2} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} + \dots + \\
& \sum_{\substack{k_d=k_{d-1} \\ \vdots \\ k_2=k_1 \\ k_1=0}}^{m-1} f_{dk_1k_2\dots k_d} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} \dots X_{t-k_d\tau}
\end{aligned} \tag{17}$$

با استفاده از  $n$  تعداد  $X_{T_h}$  و  $X_{T_{h+p}}$  برای مقادیر از پیش تعیین شده، ضرایب  $f$  توسط معادله زیر تعیین می شوند

$$x \cong Af \tag{18}$$

که در این رابطه:

$$x = (x_{T_{1+p}}, x_{T_{2+p}}, \dots, x_{T_{n+p}}) \tag{19}$$

$$f = (f_0, f_{10}, f_{11}, \dots, f_{1(m-1)}, f_{200}, \dots, f_{d(m-1)(m-1)\dots(m-1)}) \tag{20}$$

و  $A$  ماتریکس ژاکوبین  $n \times (m+d)!$  می باشد که بصورت زیر تعریف می شود:

$$A = \begin{bmatrix} 1x_{T_1} & x_{T_1\tau} & \dots & x_{T_1(m-1)\tau} & x_{T_1}^2 & \dots & x_{T_1(m-1)\tau}^d \\ 1x_{T_2} & x_{T_2\tau} & \dots & x_{T_2(m-1)\tau} & x_{T_2}^2 & \dots & x_{T_2(m-1)\tau}^d \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1x_{T_n} & x_{T_n\tau} & \dots & x_{T_n(m-1)\tau} & x_{T_n}^2 & \dots & x_{T_n(m-1)\tau}^d \end{bmatrix} \tag{21}$$

البته قابل ذکر است که اگر  $f$  حتی یک چند جمله ای درجه اول باشد، پیش بینی باز هم بصورت غیر خطی خواهد بود، زیرا در طی

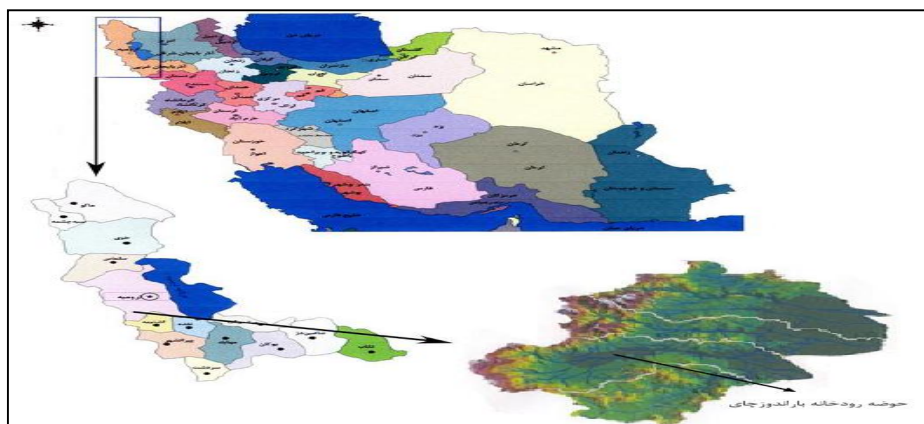
فرآیند پیش بینی، هر نقطه از  $x(t)$  دارای همسایگی متفاوت خواهد بود که منجر به همسایگی های متفاوت و بیان های متفاوت برای  $f$

خواهد شد (پرپرآتو و ریدلفی، ۱۹۹۷).



## منطقه و داده های مورد استفاده

در این تحقیق از داده های دبی رودخانه باراندوزچای استفاده گردیده است. حوضه باراندوزچای با مساحت 1203 کیلومتر مربع در شمال غربی بین دریاچه ارومیه و مرز ایران با کشورهای عراق و ترکیه قرار دارد. گستردگی جغرافیایی این حوضه از  $45^{\circ}14'$  تا  $44^{\circ}45'$  شرقی و  $37^{\circ}06'$  تا  $37^{\circ}29'$  عرض شمالی قرار دارد. طول آبراهه اصلی 75 کیلومتر بوده، بیشینه ارتفاع این حوضه 3500 متر و کمینه ارتفاع در خروجی معادل 1250 متر از سطح آزاد آبها می باشد. این حوضه دارای چهار ایستگاه هیدرومتری در مناطق ببارود، دیزج، قاسملو و بی کران می باشد. در شکل (2) موقعیت زیر حوضه باراندوز چای نشان داده شده است.



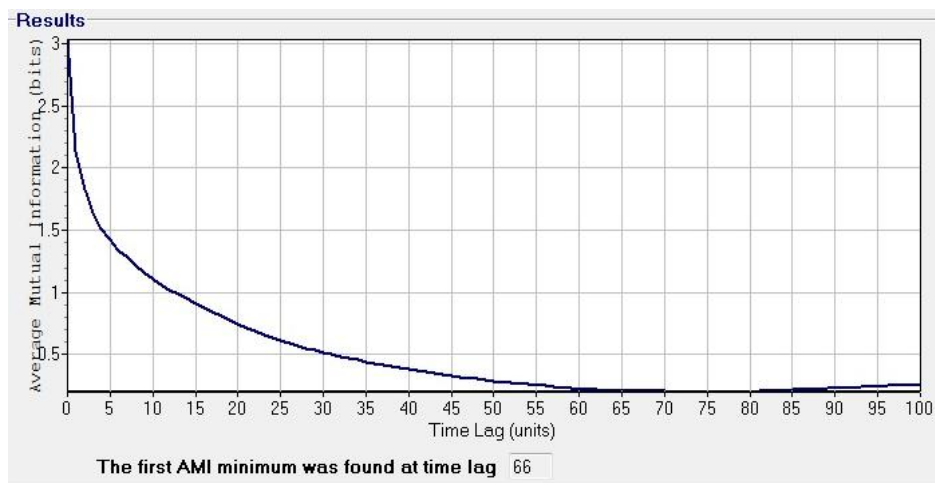
شکل 3: موقعیت حوضه رودخانه باراندوزچای در استان آذربایجان غربی

| نوع داده                     | حداقل | حداکثر | میانگین | واریانس | انحراف معیار | ضریب چولگی | ضریب کشیدگی |
|------------------------------|-------|--------|---------|---------|--------------|------------|-------------|
| دبی جریان<br>(ثانیه/مترمکعب) | 0/001 | 132/96 | 7/8751  | 92/294  | 9/607        | 3/0103     | 15/240      |

جدول 1: مشخصات آماری داده های رودخانه باراندوزچای (1764 داده)

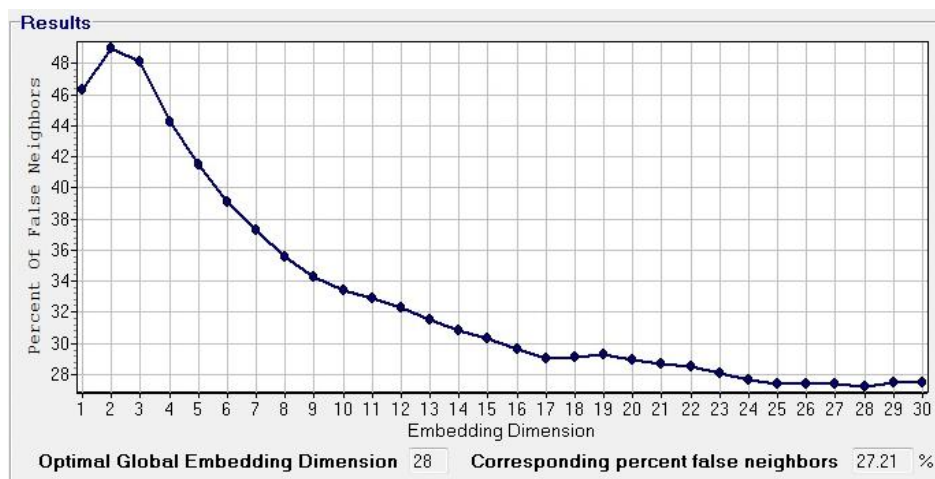
## نتایج و بحث

آمار و اطلاعات اخذ شده از سازمان آب منطقه ای ارومیه مربوط به رودخانه بارون چای شامل یک دوره آماری حدوداً 5 ساله (سال 83 تا 88) که در آن نمونه گیری دبی جریان و رسوب معلق روزانه (به تعداد 1764 داده) همزمان انجام گرفته است. پس از حذف داده های پرت و آزمون همگنی، برای ارزیابی سری زمانی رسوب معلق از نرم افزار VRA (Visual Recurrence Analysis) بهره می گیریم. بدین منظور فایل مربوط به داده های رسوب معلق (1669 داده) را در محیط نرم افزار VRA بار گذاری می کنیم.



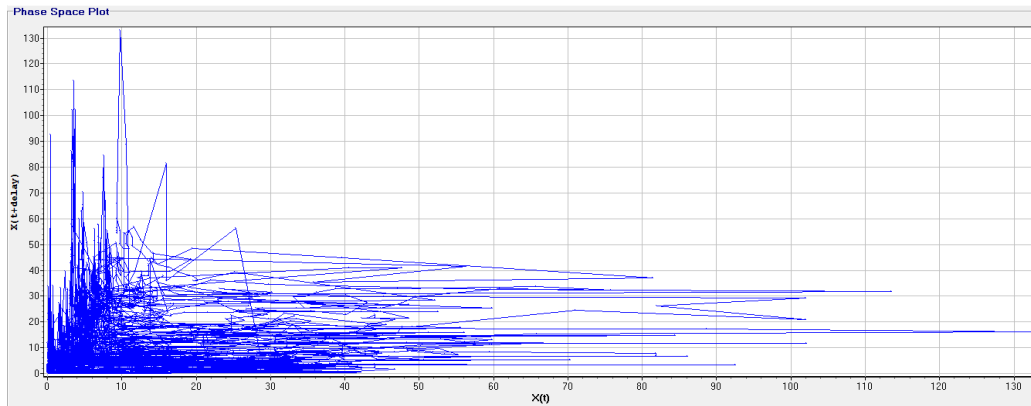
شکل 4: تابع اطلاعات متقابل دبی جریان رودخانه باراندوز چای در مقیاس زمانی روزانه

همانطور که در شکل (4) مشاهده می شود، مقدار زمان تأخیر برای دبی جریان در مقیاس زمانی روزانه، و با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل مقدار 66 به دست آمده است. با توجه به شکل (5) مقدار بعد محاط 28 برای دبی رودخانه در مقیاس زمانی روزانه به دست آمده است.



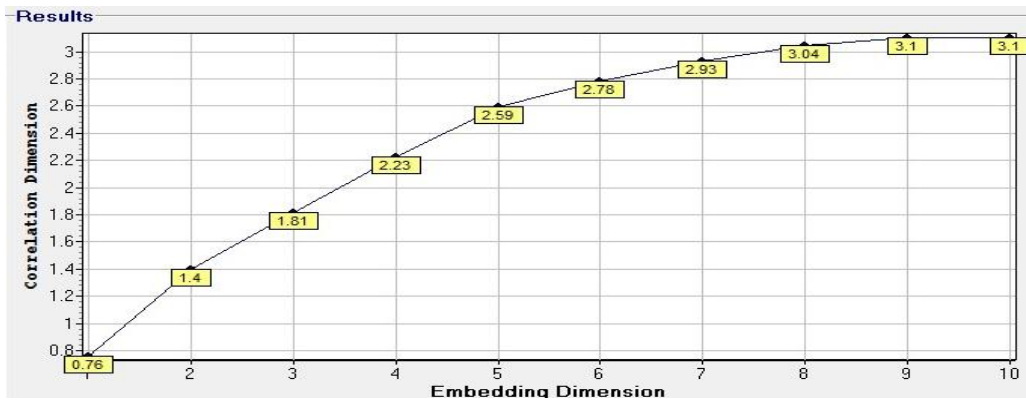
شکل 5: مقادیر درصد نزدیک ترین همسایگی کاذب به ازای ابعاد مختلف رودخانه باراندوز چای

ترسیم داده های سری زمانی داخل فضای حالت امکان نمایش سری های زمانی را در یک حالت مکانی می دهد. با توجه به مقدار زمان تأخیر بدست آمده از روش میانگین اطلاعات متقابل نمودار فضای حالت دو بعدی دبی جریان در مقیاس زمانی روزانه، در شکل (6) رسم گردیده است.



شکل 6: فضای حالت دبی جریان رودخانه باراندوز چای

تابع همبستگی دبی جریان رودخانه در مقیاس زمانی روزانه با استفاده از زمان تأخیر محاسبه شده به روش میانگین اطلاعات متقابل و به ازای ابعاد محاط 1 تا 10 محاسبه شده و در شکل (7) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار توان همبستگی به ازای دبی جریان روزانه، با افزایش بعد محاط تا نقطه معینی، زیاد شده و از آن نقطه به بعد، شروع به اشباع شدن می نماید. اشباع توان همبستگی در مقدار معینی از بعد محاط، نشان دهنده وجود دینامیک قطعی در دبی جریان روزانه است. مقدار توان همبستگی در این مقیاس زمانی از حد معینی فراتر نرفته است. در واقع نزدیک ترین عدد صحیح به مقدار اشباع شده توان همبستگی، تعداد متغیرهای لازم برای تشریح سیستم را بدست می دهد که همان بعد همبستگی (بعد فرکتال) نامیده می شود (3-d).



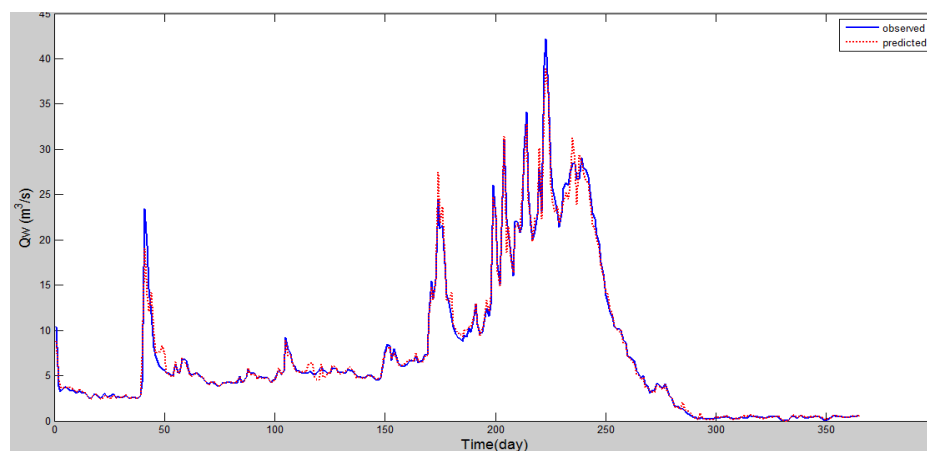
شکل 7: نمودار تغییرات بعد همبستگی با افزایش بعد محاط دبی جریان رودخانه باراندوز چای

با توجه به مقادیر  $R^2$  و RMSE در جدول (2) می توان بعد محاط 4 را برای سری داده های دبی جریان رودخانه باراندوز چای بهینه دانست.

جدول 2: مؤلفه های آماری پیش بینی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای با ابعاد محاط مختلف

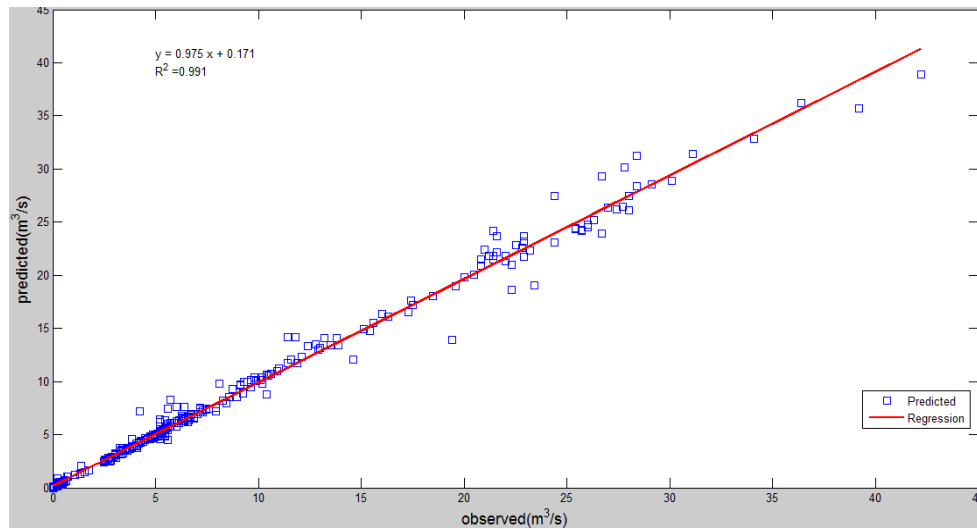
| دبی جریان روزانه |        |            |       |        |            |
|------------------|--------|------------|-------|--------|------------|
| R <sup>2</sup>   | RMSE   | ED بعدمحاط | R2    | RMSE   | ED بعدمحاط |
| 0/982            | 1/0982 | 7          |       |        | 1          |
| 0/937            | 2/1623 | 8          | 0/987 | 0/9275 | 2          |
| 0/967            | 1/4924 | 9          | 0/991 | 0/8100 | 3          |
| 0/962            | 1/6060 | 10         | 0/991 | 0/8034 | 4          |
| 0/945            | 1/9826 | 11         | 0/986 | 0/9492 | 5          |
| 0/983            | 1/0611 | 12         | 0/974 | 1/3101 | 6          |

در شکل (8) نمودار دبی جریان روزانه داده های مشاهداتی و داده های محاسباتی در مقابل زمان رسم شده اند که همپوشانی مناسب دو نمودار میزان همبستگی بالای مقادیر دبی روزانه را بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نشان می دهد.



شکل 8: نمودار مربوط به مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دبی جریان روزانه رودخانه باراندوز چای با مدل نظریه آشوب

در شکل (9) مشاهده می شود که پراکنش داده ها حول خط رگرسیون به طور نسبتاً یکنواخت بوده و این خود به عبارتی بیانگر همبستگی بالای داده های دبی مشاهداتی و مقادیر محاسباتی پیش بینی شده می باشد.



شکل 9: نمودار پراکنش داده های رسوب مشاهداتی و محاسباتی و خط رگرسیون داده ها

### خلاصه نتایج

زمان تأخیر از روش میانگین اطلاعات متقابل برای باراندوز چای برابر 66 به دست آمد. با استفاده از روش نزدیک ترین همسایگی کاذب مناسب ترین بعد محاط برابر 28 تعیین شد. بعد همبستگی برای سری زمانی دبی جریان برابر 3/1 بوده یعنی تعداد متغیرهای لازم برای تشریح سیستم برابر 3 است. مقدار کم بعد همبستگی (d) به دست آمده در مقیاس زمانی روزانه نشان دهنده وجود آشوب در سری زمانی دبی جریان رودخانه باراندوزچای می باشد.

از آنجایی که بعد محاط (m) محاسبه شده به روش نزدیکترین همسایگی کاذب در این تحقیق تا حدودی زیاد بوده، به منظور فرآیند پیش بینی از مقادیر بعد محاط  $d < m \leq 2d + 1$  (یعنی از ابعاد محاط 4 تا 7) استفاده می گردد تا بهترین پیش بینی در بعد محاط مناسب به دست آید. در فرآیند پیش بینی با نرم افزار TISEAN با توجه به جدول (2) به ازای بعد محاط بهینه 4، مقادیر به دست آمده برای RMSE و  $R^2$  به ترتیب برابر 0/8034 و 0/991 می باشد.

### پیشنهادات

- پیشنهاد می گردد که در پیش بینی رسوبات معلق رودخانه، کارایی نظریه آشوب و روش شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گیرد و نتایج حاصل از دو روش با هم مقایسه شوند.
- تحلیل آشوبناک در سایر سری های زمانی از جمله بارش، دبی جریان رودخانه و کیفیت آب به کار گرفته شود.
- پیشنهاد می گردد که رابطه بین دبی جریان و رسوب معلق روزانه در رودخانه مهاباد با استفاده از سری های زمانی آریمادل شده و مقادیر رسوب حاصل از مدل با تئوری آشوب مورد بحث و ارزیابی قرار گیرد.

## منابع

- احمدی، ح.، طهمورث، م. و محمدعسگری، ح. (1387). استفاده از نظام استنتاج فازی در برآورد رسوب معلق. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری، سال دوم، شماره 5، ص. 53-62.
- پری زنگنه، م.، عطایی، م. و معلم، پ. (1388). بازسازی فضای حالت سری های زمانی آشوبی با استفاده از یک روش هوشمند. نشریه الکترونیک و قدرت دانشکده مهندسی برق، سال اول، شماره دوم، ص. 34-48.
- عطایی، م. (1384). نقش بازسازی فضای حالت در تحلیل سیستم های آشوب گونه و نحوه تعیین پارامترهای مربوطه، مجموعه مقالات دومین همایش آشوب و سیستم های دینامیکی غیرخطی. ایران
- فرزین، س.، شیخ الاسلامی، س. ی. و حسن زاده، ی. (1390). تحلیل آشوب پذیری سری زمانی با استفاده از ترسیم فضای فاز و روش بعد همبستگی (بارش ماهانه دریاچه ارومیه). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، 13 و 14 اردیبهشت. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص. 31-33.
- Damle, C. and Yalcin, A. (2007).** Flood Prediction Using Time Series Data Mining. Journal of Hydrology. No. 333, pp.305-316
- Farser, A. M. and Swinney, H. L. (1986).** Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information. Physical Review A. Vol. 33, No.2, pp.1134-1140.
- Ghorbani, M., A. Kisi, O. and Aalinezhad, M. (2011).** A Probe into the Chaotic Nature of Daily Stream Flow time Series by Correlation Dimension and Largest Lyapanov Methods. Applied Mathematical Modelling. 34, pp.4050-4057
- Kennel, M., Brown, R. and Abarbanel, H. D. I. (1992).** Determining Embedding Dimension for Phase- Space Reconstruction Using a Geometrical Construction. Physical Review A. No.45 (6), pp.3403-3411
- Khan, S., Ganguly, A. R. and Saigal, S. (2005).** Detection and Predictive Modeling of Chaos in Finite Hydrological Time Series. Nonlinear Processes in Geophysics, No. 12, pp. 41– 53
- Kocak, K., Saylan, L. and Sen, O. (2000).** Nonlinear Time Series Prediction Of O3 Concentration In Istanbul. Atmosphere Environment, 34, pp. 1267 – 1271.
- Lisi, F. and Villi, V. (2002).** Chaotic forecasting of discharge time series. A case study. J. Am. Water Resour. Assoc. 37, pp. 271-279
- Porporato, A. and Ridolfi, L. (1997).** Nonlinear analysis of river flow time sequences. Water Resources Research. No. 33(6), pp. 1353 - 1367.
- Shang, P. X. Na. and Kamae, S. (2009).** Chaotic analysis of Chaos, Solitons and Fractals. No. 41 time series in the sediment transport phenomenon, Pp.379-368
- Sivakumar, B., Berndtsson, R. and Persson, M. (2001).** Monthly runoff prediction using phase space reconstruction. Hydrol. Sci. J. 46, pp.377-378.
- Solomatine, D. P., Velickov, S. and Wust, J. C. (2001).** Predicting Water Levels and Currents in The North Sea Using Chaos Theory and Neural Networks, Proc. 29 th Iahr Congress, Beijin, Chin, pp.32-45.
- Stehlik, J. (1999).** Deterministic chaos in runoff series., J. Hydrol. Hydromech. 47, pp.271-287.