

# پایش و پیش‌بینی تغییر شکل سه‌بعدی سازه‌های مهندسی بزرگ با استفاده از تلفیق تصاویر راداری و مشاهدات ژئودتیکی (مورد مطالعاتی سد درودزن) (فارس)

مهدی طاهری نژاد<sup>۱\*</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۲</sup>، سعید حاجی آقاجانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
mahdi\_taherinejad@mail.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
vosoghi@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
s\_h\_aghajany@mail.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت آبان ۱۳۹۵، تاریخ تصویب فروردین ۱۳۹۶)

## خلاصه

با افزایش تعداد سازه‌های مهندسی بزرگ در شهرها، متخصصین همواره درصدد دستیابی به راه‌حل مناسبی برای پایش این سازه‌ها می‌باشند تا بتوانند از آسیب‌های ناشی از تخریب این سازه‌ها که اغلب خسارات جبران‌ناپذیری در پی دارد، جلوگیری نمایند. از آنجایی که پایش سازه با استفاده از روش‌های سنتی بسیار دشوار و پرهزینه است، تصاویر راداری به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا، دید وسیع و دقت قابل قبول به عنوان یک ابزار مناسب برای این منظور مطرح گردیده‌اند. در این مقاله با استفاده از تلفیق تصاویر راداری و داده‌های پایشی موجود از سد، میدان سرعت جابجایی سه بعدی سد محاسبه گردیده است. سپس با استخراج مشاهدات مربوط به سازه‌ی سد درودزن فارس و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تغییر شکل سه بعدی این سازه در نقطه‌ای در نزدیکی تاج سد تا سال ۲۰۲۳ پیش‌بینی گردید. ضریب همبستگی بین مدل پیش‌بینی و نتایج بدست آمده از روش تلفیق برای این نقطه در جهت شرقی، شمالی و ارتفاعی به ترتیب ۰/۶۴-۰/۶۲-۰/۷۷ بدست آمد. علاوه بر این RMSE نتایج بدست آمده در راستاهای شرقی، شمالی و ارتفاعی برابر ۵/۱۲-۸/۵۴-۷/۸۷ میلی‌متر محاسبه گردید که این نتایج نمایانگر همبستگی بالای مدل پیش‌بینی شده با نتایج بدست آمده از روش تلفیق می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** پایش، تصاویر راداری، سد درودزن، شبکه عصبی مصنوعی

## ۱- مقدمه

سازه‌های مهندسی موجود بدلیل عوامل مختلف از جمله بارگذاری‌های پیش‌بینی نشده و همچنین نشست زمین دچار تغییر شکل شده و مشکلاتی را برهم می‌زنند. این مشکلات با بارگذاری اضافی حاصل از خطرات طبیعی یا مصنوعی مانند زلزله و انفجار تشدید می‌گردند. خرابی‌ها ممکن است بطور ناگهانی و یا در طول زمان رخ دهند. آنچه پس از ساخت و بهره‌برداری از یک سازه بزرگ اهمیت می‌یابد، پیش‌آن سازه بمنظور جلوگیری از آسیب-های جانی و مالی می‌باشد. مهندسان سال‌هاست به تلاش برای دستیابی به روشی بهینه برای این منظور پرداخته‌اند. روش‌هایی که تاکنون برای این منظور استفاده شده است از جمله استفاده از مشاهدات ژئودتیکی و همچنین حسگرهای تغییر شکل هزینه بسیار بالایی در پی دارند و علاوه بر این استفاده از آن‌ها و پیاده سازی الگوریتم آن‌ها نیازمند زمان بسیار زیادی می‌باشد.

شهرهای امروزی مملو از سازه‌های بزرگ اند که پیش آن‌ها به روش‌های سنتی نیازمند هزینه و زمان بسیار بالایی است. پس از روبرو شدن با این مشکل، متخصصین به فکر استفاده از ابزارهای افتادند که در قالب آن بتوانند چند سازه را همزمان و با حداقل هزینه پیش کنند و نیازمند استفاده از تعداد بسیاری حسگر یا تعداد بسیاری ایستگاه‌های مشاهدات ژئودتیکی در اطراف هر سازه نباشند. به همین دلیل ایده استفاده از تصاویر راداری که دقت در حد میلی‌متر داشته و با دید وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالای خود توانایی پوشش یک شهر را دارند، مطرح گردید. همچنین روش نوینی که امکان تلفیق تصاویر راداری با مشاهدات دیگر به منظور دستیابی به میدان جابجایی سه بعدی را فراهم ساخته است سبب شده تا استفاده از تصاویر راداری به منظور پیش‌بینی تغییر شکل سازه‌های مهندسی در سال‌های اخیر مطرح گردد که در زیر سه نمونه از آنها بیان می‌شود.

در سال ۲۰۰۸، کرزانوفسکی و همکاران جابجایی افقی و نشست یک سد بر روی دریاچه‌ای واقع در کالیفرنیا را با روش اجزاء محدود و با استفاده از مصالح به کار رفته در سد و خصوصیات آن مصالح تحلیل نمودند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل این سد تا ۷ سال پس از ساخت نیز ادامه داشته است [۱].

در سال ۲۰۱۰، دنیل و همکاران تغییر شکل بزرگراه در اسپانیا را با تصاویر TerraSar-X(TSX) بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد بیشینه سرعت تغییر شکل بر روی پل دسترسی این بزرگراه و به میزان ۳۰ میلی‌متر در سال است ولی پل اصلی ثابت بوده است [۲].

در سال ۲۰۱۲، ژانگ و همکاران تغییر شکل یک پل در چین را با استفاده از تصاویر ماهواره ENVISAT و با نصب چند بازتابنده در اطراف پل با روش CRI<sup>۱</sup> بدست آورده‌اند که بیشینه سرعت تغییر شکل در روی پل ۱۵ میلی‌متر در سال بوده است [۳].

در این مقاله ما به مطالعه تغییر شکل سد درودزن فارس خواهیم پرداخت و با استفاده از تصاویر راداری ماهواره ENVISAT بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و داده‌های پایشی موجود از سد بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و استفاده از روش جدید SISTEM<sup>۲</sup> تغییر شکل سه بعدی این سد را محاسبه خواهیم نمود. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی که ابزاری قدرتمند و نوین در زمینه پیش‌بینی سری زمانی است، تغییر شکل این سد را تا سال ۲۰۲۳ پیش‌بینی می‌نماییم. در صورت مشاهده تغییر شکلی خارج از روند پیش‌بینی در آینده، می‌توانیم اعلام خطر کرده و از بوجود آمدن مشکلات و خسارات بعدی جلوگیری نماییم.

## ۲- محاسبه میدان جابجایی در راستای خط دید ماهواره با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

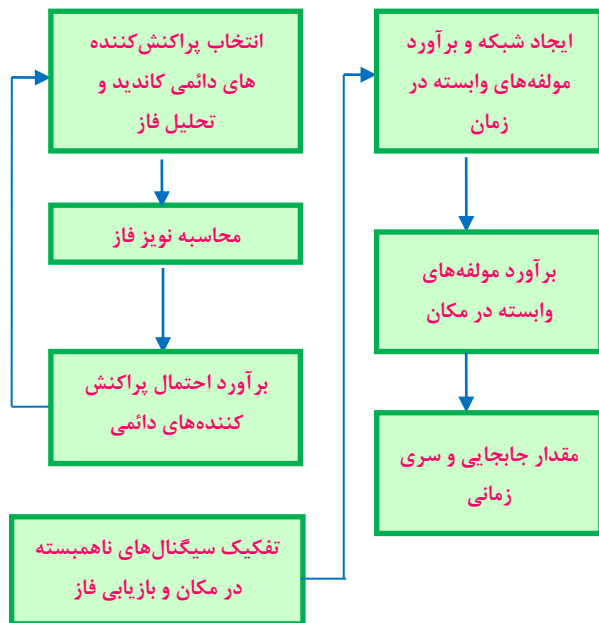
هر تصویر راداری از دو سری اطلاعات به نام فاز و دامنه تشکیل شده است که تداخل‌سنجی راداری بر مبنای اطلاعات فاز تصاویر راداری صورت می‌گیرد. مسئله مورد توجه آن است که عوامل گوناگونی بر فاز بدست آمده از تصاویر راداری تاثیرگذارند. گذر سیگنال راداری از جو همچنین اثر تغییر شکل زمین، نویز، خطای مداری و بالاخره اثر مربوط به توپوگرافی منطقه باعث تغییر در عدد فاز پیکسل‌های یک تصویر راداری می‌گردد. اگر فاز دو تصویر راداری را از هم کسر کنیم آنگاه تصویری به نام تداخل‌نما<sup>۳</sup> خواهیم داشت که معادله فاز آن به شکل زیر است [۴]:

<sup>۱</sup> Simultaneous and Integrated Strain Tensor Estimation from geodetic and satellite deformation Measurements

<sup>۲</sup> Simultaneous and Integrated Strain Tensor Estimation from geodetic and satellite deformation Measurements

<sup>۳</sup> Interferogram

شکل ۲ مراحل پردازش الگوریتم پراکنش‌کننده‌های دائمی را نشان می‌دهد [۵].



شکل ۲- مراحل پردازش در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی

### ۳- محاسبه میدان جابجایی سه بعدی با تلفیق تداخل‌سنجی راداری و مشاهدات GPS

برای محاسبه میدان جابجایی سه بعدی با استفاده از تداخل‌سنجی راداری نیاز به دو گذر با قاب‌های متفاوت از منطقه مورد نظر داریم که هر کدام از قاب‌ها به منزله یک معادله مشاهده است. در نتیجه دو قاب از تصاویر راداری می‌توانند با استفاده از معادلات مربوطه دو بعد از میدان جابجایی که ابعاد شرقی-غربی و ارتفاعی هستند را محاسبه نمایند [۶]. برای محاسبه بعد دوم یا بعد شمالی-جنوبی جابجایی اوضاع کمی متفاوت است. ماهواره راداری به دلیل خاصیت مداری ذاتی خود نسبت به تغییرات در راستای بعد دوم جابجایی و به عبارت دیگر بعد شمالی حساسیت کمتری دارد [۶]. برای محاسبه این بعد می‌بایست از یک معادله اضافی با نام معادله آزیموت آفست استفاده شود تا با استفاده از سه معادله و سه مجهول جابجایی برای هر پیکسل میدان جابجایی سه بعدی محاسبه گردد. این معادله علی‌رغم محاسبه بعد دوم جابجایی دقت بالایی در این اندازه‌گیری ندارد و مقداری خطا به محاسبات هر تداخل‌نما اضافه می‌نماید. این مطلب باعث شد برای محاسبه میدان جابجایی سه بعدی در

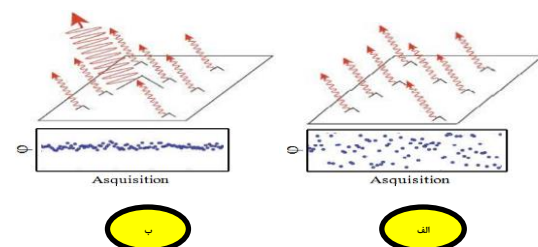
$$\varphi_{\text{int}} = \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{deformation}} + \Delta\varphi_{\text{atmosphere}} + \Delta\varphi_{\text{orbital}} + \Delta\varphi_{\text{noise}} \quad (1)$$

به منظور دستیابی به میزان تغییر شکل، لازم است اختلاف فازهای ناشی از نویز، خطای مداری، جو و توپوگرافی تصحیح گردند تا فاز تداخل‌نمای موجود، تنها ناشی از تغییر شکل زمین در بازه زمانی دو تصویر راداری باشد. به منظور تصحیح اثر مداری و توپوگرافی از اطلاعات مداری و مدل ارتفاعی رقومی منطقه استفاده می‌گردد. همچنین نویز مربوط به اثرات اتمسفر نیز با استفاده از روش‌های پیش فرض تا حد بسیاری تصحیح گردید.

یکی از روش‌های تعیین میدان جابجایی در راستای خط دید ماهواره استفاده از پراکنش‌کننده‌های دائمی<sup>۱</sup> است، از نظر فیزیکی این پراکنش‌کننده‌ها می‌توانند گوشه یک ساختمان، تنه درخت، تخته سنگ و... باشند. بنابراین می‌توان با استفاده از تمام تصاویر و بدون توجه به عدم همبستگی زمانی و مکانی، تداخل‌نماهایی تشکیل داد که فاز آن‌ها تنها در نقاط پراکنش‌کننده‌های دائمی قابل استفاده می‌باشد.

در تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی، پیکسل‌هایی پراکنش‌کننده دائمی هستند که تاریخچه رفتار فاز آن‌ها منطبق بر یک مدل فرضی از چگونگی تغییر جابجایی در زمان می‌باشد.

در روش پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از تحلیل فاز می‌توانیم بسیاری از نقاط پراکنش‌کننده دائمی را که حتی در مناطق غیر شهری قرار دارند، مشخص نماییم [۴]. شکل ۱ تفاوت پیکسل‌های دارای پراکنش دائمی و پیکسل‌های دارای پراکنش غیر دائم را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۱- شبیه‌سازی فاز دریافتی. (الف) پراکنش غیردائم و (ب) پراکنش دائم [۴]

دستگاه معادلات مشاهدات برای حل این مسئله به شکل زیر است:

$$\mathbf{A}_{(3n+1) \times 12} \cdot \mathbf{x}_{12 \times 1} = \mathbf{I}_{(3n+1) \times 1} \quad (8)$$

$\mathbf{A}$ : ماتریس ضرایب

$\mathbf{x}$ : بردار مجهولات  $[U_1 U_2 U_3 \varepsilon_{11} \varepsilon_{12} \varepsilon_{13} \varepsilon_{22} \varepsilon_{23} \varepsilon_{33} \omega_1 \omega_2 \omega_3]^T$

$\mathbf{I}$ : بردار مشاهدات  $[u_{11} u_{21} u_{31} \dots u_{1n} u_{2n} u_{3n}]^T$

$$\mathbf{D}_{LOS(P)} = [U_1, U_2, U_3] \cdot [B_{Px}, B_{Py}, B_{Pz}]^T \quad (9)$$

$\mathbf{D}_{LOS(P)}$ : جابجایی در راستای خط دید ماهواره در نقطه P

$[B_{Px}, B_{Py}, B_{Pz}]$ : بردار واحد امتداد نقطه P و ماهواره

حال بردار  $\mathbf{I}$  را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\mathbf{I} = [u_{11} u_{21} u_{31} \dots u_{1n} u_{2n} u_{3n} \mathbf{D}_{LOS(P)}]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{11} & \Delta x_{21} & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{11} & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{Px} & B_{Py} & B_{Pz} & 0 & 0 & \dots \end{pmatrix} \quad (11)$$

با در اختیار داشتن موقعیت پراکنش‌کننده‌ها در میدان جابجایی محاسبه شده از تداخل‌سنجی راداری و بردار یکه خط دید ماهواره، ماتریس ضرایب محاسبه شده و با در نظر گرفتن بردار مشاهدات به روش بالا و استفاده از سرشکنی، میدان جابجایی سه بعدی قابل محاسبه است [۶].

در این مقاله ما از این روش برای تلفیق داده‌های راداری با داده‌های پایشی موجود از سد برای محاسبه میدان سرعت جابجایی سه بعدی استفاده نمودیم.

#### ۴- پیش‌بینی سری زمانی جابجایی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی کاربرد وسیعی در زمینه‌هایی از قبیل پردازش سیگنال، شناسایی الگوریتم، تشخیص پزشکی، تعیین عوارض ژئوفیزیکی، مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی، درون‌یابی، پیش‌بینی و مدل‌های آماری دارند [۷].

دقت اجرای این شبکه‌ها در حالت وابستگی پارامترهای ورودی و حتی وجود نویز در داده‌ها مناسب بوده و با امکان آموزش‌پذیری مجدد در هنگام ورود داده‌های جدید، از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار هستند [۷].

منطقه از روش مناسب‌تری استفاده کنیم [۶]. در کنار دقت پایین GPS در اندازه‌گیری‌های ارتفاعی، تداخل‌سنجی راداری به جهت مشخصات مداری ماهواره راداری در محاسبه جابجایی در راستای ارتفاعی دقت بالایی دارد. به همین جهت تلفیق این دو نوع داده، نتایج مناسب‌تری از جابجایی ایجاد شده در منطقه در اختیار قرار می‌دهد. یکی از روش‌های تلفیق مشاهدات راداری و GPS استفاده از روش سیستم است که مبنای این روش استفاده از دو نوع مشاهده موجود و فاصله پراکنش‌کننده‌ها با ایستگاه-های GPS است. روابط مربوط به این روش در زیر مشاهده می‌گردد [۶].

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{H}_{ij} \Delta \mathbf{x}_{jn} + \mathbf{U}_i \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{x}_{jn} = \mathbf{x}_{jn} - \mathbf{x}_j \quad (3)$$

P: نقطه دلخواه: n: شماره ایستگاه GPS

$\mathbf{X}_0(x_{10}, x_{20}, x_{30})$ : موقعیت نقطه P

$\mathbf{U}_i$ : جابجایی نقطه P

N: تعداد ایستگاه‌های GPS

$\mathbf{X}_n(x_{1n}, x_{2n}, x_{3n})$ : موقعیت ایستگاه‌های GPS

$\mathbf{U}_n(u_{1n}, u_{2n}, u_{3n})$ : جابجایی ایستگاه‌های GPS

$\Delta \mathbf{x}$ : فاصله هر نقطه از ایستگاه GPS

می‌دانیم تانسور گرادیان جابجایی از رابطه زیر قابل محاسبه است [۶]:

$$\mathbf{H}_{ij} = \partial u_i / \partial x_j \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{E} + \mathbf{\Omega} \quad (5)$$

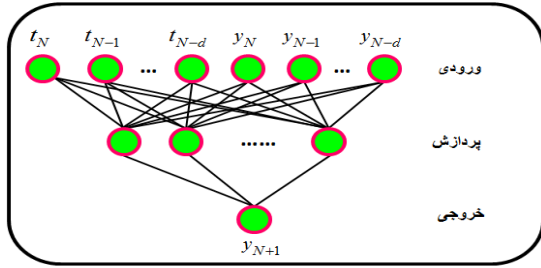
$$\mathbf{E} = \varepsilon_{ij} = 0.5(\mathbf{H}_{ij} + \mathbf{H}_{ji}) \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j$$

$$= \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{\Omega} = \omega_{ij} = 0.5(\mathbf{H}_{ij} - \mathbf{H}_{ji}) \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j$$

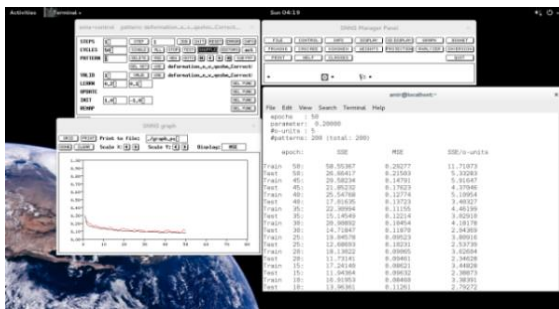
$$= \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

که در روابط بالا  $\otimes$  علامت ضرب تانسوری است. همچنین  $\mathbf{E}$  تانسور استرین و  $\mathbf{\Omega}$  تانسور دوران می‌باشد.



شکل ۳- الگوریتم مورد استفاده در شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی

شبیه‌ساز شبکه عصبی اشتوتگارت (SNNS)<sup>۱</sup>، نرم‌افزار رایگان تحت سیستم عامل لینوکس است که در این مقاله برای اجرای شبکه عصبی به کار گرفته شده است. این شبیه‌ساز در دانشگاه اشتوتگارت به منظور ایجاد محیط شبیه‌سازی انعطاف پذیر و مفید برای کار با شبکه های عصبی معرفی شد که امکان طراحی و امتحان توپولوژی برتر را فراهم می‌کند. این نرم افزار شامل بیش از ۲۰ مدل شبکه عصبی و مدل های آموزش مربوط به آنها است که امکان توسعه آنها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C وجود دارد. برای جلوگیری از عدم قطعیت ناشی از مقداره‌ی اولیه تصادفی برای وزن‌های شبکه، فرآیند آموزش چندین مرتبه تکرار می‌شود و برآورد نهایی پارامترها بر مبنای میانگین نتایج محاسبه می‌شود [۸]. آموزش شبکه با استفاده از مجموعه‌های آموزش و ارزیابی و در چندین اپک انجام می‌گیرد. در هر اپک تمام نمونه های آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمانی که آموزش شبکه شروع می‌شود، خطای واحدهای خروجی پس از هر اپک محاسبه شده و برخی از محاسبات بر روی صفحه، نمایش داده می‌شود. در شکل ۴ محیط کار این نرم‌افزار، پنجره‌های اصلی، نمونه‌ای از نمودار خطا و نتایج چاپ شده را می‌توان مشاهده نمود [۸].



شکل ۴- نمایش محیط نرم‌افزار SNNS

شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از دانش تجربی آموزش داده می‌شوند و سپس با تعمیم دانش به دست آمده درک بهتری از محیط به دست می‌آورند. منظور از تعمیم، ارائه خروجی قابل قبول برای ورودی‌هایی است که قبلاً وارد سیستم نشده‌اند [۷]. امروزه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای حل مسائلی به کار می‌روند که نمی‌توان آنها را در قالب روابط معلوم و صریح ریاضی به سادگی بیان کرد لذا با معلوم بودن تعدادی پارامتر ورودی و خروجی و با تعدیل نمودن وزن بین اتصالات می‌توان ارتباط بین ورودی و خروجی شبکه را مدل کرد [۷].

بزرگترین مزیت شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش‌های قدیمی پیش‌بینی، قابلیت در نظر گرفتن تغییرات غیرخطی است. این مسئله را در این الگوریتم می‌توان به شکل زیر مدل‌سازی کرد [۷]:

$$\hat{y}(t+p) = f(y(t), \dots, y(t-d_y)) \quad (12)$$

تابع تعریف شده برای این الگوریتم بصورت زیر است:

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_x)) \quad (13)$$

به منظور آموزش شبکه از توابع  $y$  استفاده می‌نماییم. الگویی که برای آموزش شبکه استفاده می‌شود بصورت زیر است:

$$y_4 = f(y_1, y_2, y_3, t_1, t_2, t_3) \quad (14)$$

$$y_5 = f(y_2, y_3, y_4, t_2, t_3, t_4) \quad (15)$$

$$y_N = f(y_{N-3}, y_{N-2}, y_{N-1}, t_{N-3}, t_{N-2}, t_{N-1}) \quad (16)$$

بعد از آموزش شبکه، عملیات پیش‌بینی، زمانی پایان می‌یابد که تابع زیر که به عنوان خطای عملیات در نظر گرفته شده است، به میزان کمینه خود برسد [۷].

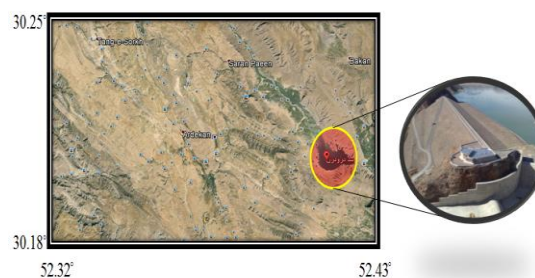
$$PE = \sum_{k=0}^N (y^{\wedge}(t-k) - y(t-k)) \quad (17)$$

که در آن  $y^{\wedge}$  مقادیر پیش‌بینی شده است. در نهایت اگر میزان اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از بازه خطای مجاز بیشتر باشد آنگاه می‌توان گفت که ناهنجاری مشاهده شده است. الگوریتم مورد استفاده در شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۳ ملاحظه می‌شود.

<sup>۱</sup> Stuttgart Neural Network Simulator

## ۵- مورد مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

به منظور ارزیابی روش‌های ذکر شده، شهر درودزن در کشور ایران را در نظر گرفتیم و در این مقاله تغییر شکل یکی از سازه‌های مهم آن یعنی سد درودزن را بررسی خواهیم کرد. سد درودزن، نام یک سد از نوع خاکی است که بر روی رودخانه کر احداث شده است. این سد در نزدیکی شهر مرودشت استان فارس قرار گرفته که تاریخچه ساخت سد در این محل به دوران هخامنشیان برمی‌گردد و همچنین این سد عنوان قدیمی ترین سد خاکی ساخته شده در خاورمیانه را نیز یدک می‌کشد. این سد بعدها مورد بازسازی قرار گرفت که سد جدید در سال ۱۳۵۱ ساخته شد. سد درودزن فارس، دارای ۷۱۰ متر طول و ۸ متر عرض تاج بوده و ارتفاع از پی آن ۵۸ متر است. شکل ۵ نشان دهنده مورد مطالعاتی می‌باشد.



شکل ۵- مورد مطالعاتی (سد درودزن فارس)

به منظور محاسبه میدان‌های جابجایی و سایر محاسبات مورد نیاز، از ۲۱ تصویر راداری ماهواره ENVISAT از گذر ۶۳ بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ که در حالت پایین‌گذر برداشت شده است و نرم‌افزار STAMPS استفاده کرده‌ایم. علت انتخاب گذر ۶۳ فواصل مکانی و زمانی مناسب‌تر بین تصاویر نسبت به سایر گذرهای موجود در منطقه بود. همچنین به منظور محاسبه میدان جابجایی سه بعدی از داده‌های پایشی موجود از سد استفاده کردیم.

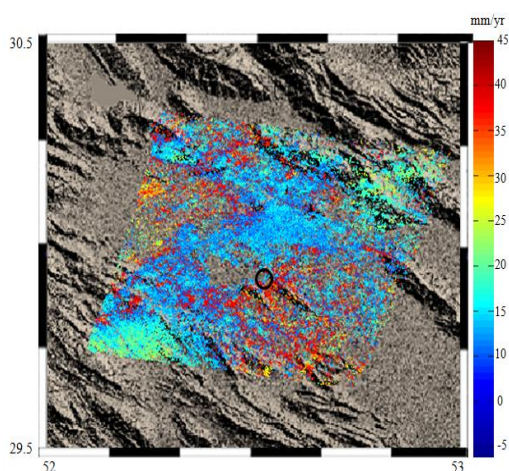
لازم به ذکر است نحوه محاسبه تداخل‌نماها حالت دوعبوره می‌باشد که در آن اثر توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی منطقه تصحیح می‌گردد. به منظور تصحیح اثر توپوگرافی، مد رقومی ارتفاعی جهانی استرا<sup>۱</sup> با فواصل مکانی 30 متر را به کار گرفتیم و به منظور تصحیح اثر مداری از اطلاعات مداری آماده شده بر سایت ENVISAT

<sup>۱</sup> Aster Global Digital Elevation Model

استفاده نمودیم و اثرات اتمسفر نیز با استفاده از روش‌های پیش فرض تا حد بسیاری تصحیح گردید.

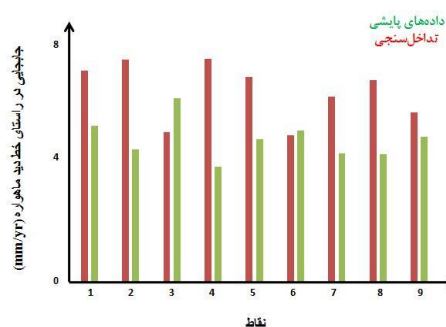
## ۶- پردازش‌ها و نتایج آن

در ابتدا به تولید تداخل‌نماهای مورد نظر پرداختیم. در واقع میزان جابجایی را در بازه‌های زمانی متفاوت بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با توجه به فواصل مکانی و زمانی تصاویر محاسبه نمودیم. سپس با استفاده از روش پراکنش کننده‌های دائمی به محاسبه میدان سرعت جابجایی در راستای خط دید ماهواره پرداختیم که شکل ۶ نشان دهنده آن می‌باشد.



شکل ۶- میدان سرعت جابجایی محاسبه شده (دایره مشکی در تصویر مکان سد می‌باشد)

حال به بررسی صحت میدان سرعت جابجایی محاسبه شده می‌پردازیم و برای این منظور از مشاهدات و نتایج بدست آمده از داده‌های پایشی موجود از سد استفاده نموده‌ایم. شکل ۷ نشان دهنده مقایسه بین نتایج بدست آمده از داده‌های پایشی موجود از سد (ترازیابی و میکروژئودزی) و سرعت جابجایی بدست آمده از تداخل-سنجی راداری در محل مربوط به داده‌های پایشی می‌باشد.



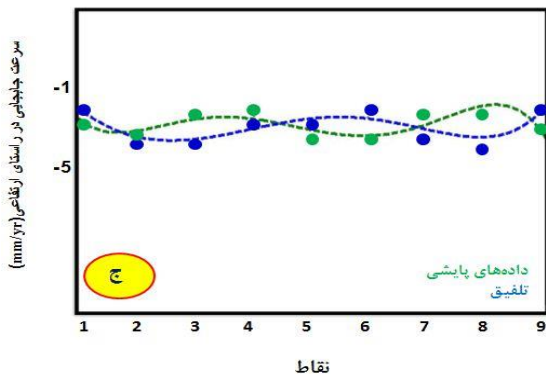
شکل ۷- مقایسه بین نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری و داده‌های پایشی

به عنوان نقاط چک در نظر گرفته شده‌اند و تمام اعداد برحسب میلی‌متر بر سال هستند).  
 برای مقایسه بهتر، اعداد و ارقام موجود در جدول را در قالب یک نمودار آورده و منحنی‌هایی را به آن‌ها برازش دادیم. منحنی‌های برازش داده شده از درجه ۵ می‌باشند. انتخاب این درجه از منحنی به دلیل آن بود که نسبت به منحنی‌های درجه ۲ و ۳ و ۴ انطباق بیشتری با مشاهدات داشت.

در شکل بالا کمترین مقدار اختلاف بین نتایج در محل نقاط ۰/۱۷ میلی‌متر بر سال و بیشترین مقدار اختلاف ۳/۵۹ میلی‌متر بر سال مشاهده گردید.  
 در مرحله بعد به محاسبه میدان جابجایی سه بعدی با استفاده از تلفیق نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری و داده‌های پایشی موجود از سد پرداختیم که نتایج آن در جدول زیر نمایان است (نقاطی از داده‌های پایشی

جدول ۱- مقایسه نتایج با داده‌های پایش زمینی موجود از سد

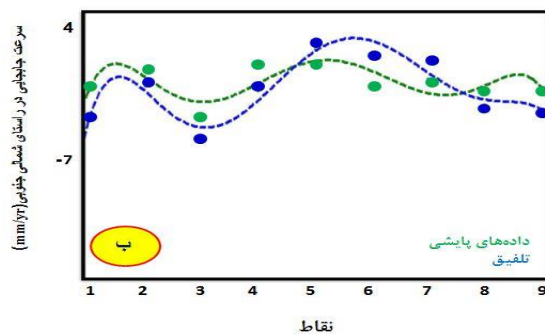
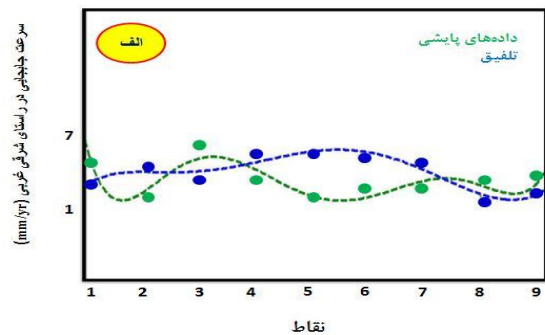
نقطه	گزارش میکرو ژئودزی بعد شرقی	گزارش میکرو ژئودزی بعد شمالی	گزارش تراز یابی بعد ارتفاعی	بعد شرقی حاصل از تلفیق	بعد شمالی حاصل از تلفیق	بعد ارتفاعی حاصل از تلفیق
۱	۵/۷	-۱	-۲/۴	۲/۶۹	-۴/۳۶	-۱/۳۶
۲	۱/۳	۱/۴	-۳/۷	۴/۲۱	-۰/۴	-۴/۱۳
۳	۶/۸	-۳/۹	-۱/۹	۳/۴۴	-۶/۱۲	-۴/۴۷
۴	۲/۹	۱/۸	-۱/۷	۵/۷۴	-۰/۹	-۲/۹۶
۵	۱/۳	۲/۱	-۴	۶/۳۹	۳/۷۶	-۲/۳۴
۶	۲	-۰/۱	-۴/۲	۵/۶۲	۳/۱۶	-۱/۹۲
۷	۱/۹	۰/۴	-۱/۹	۴/۸۱	۲/۵۳	-۳/۳۲
۸	۲/۹	-۱	-۱/۳	۱/۱۳	-۲/۴۴	-۴/۱۱
۹	۲/۵	-۰/۴	-۲/۹	۱/۳۵	-۲/۸۳	-۱/۶۲



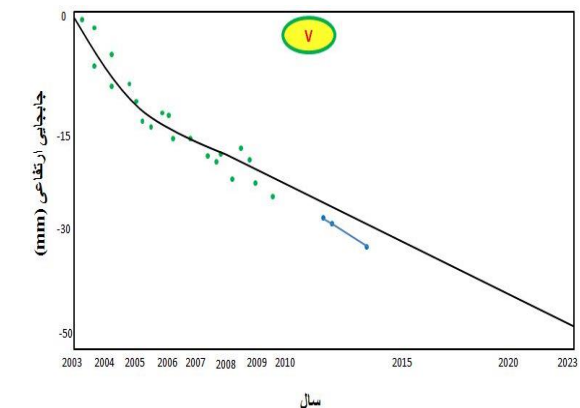
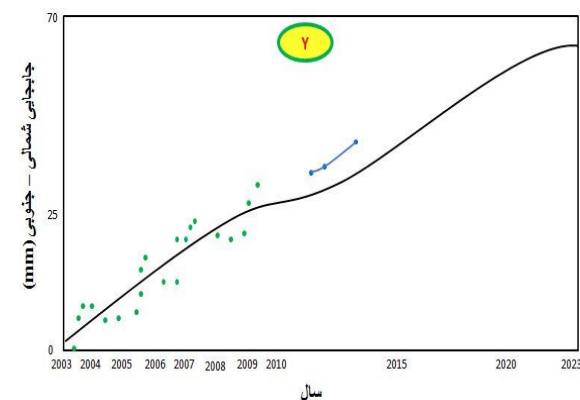
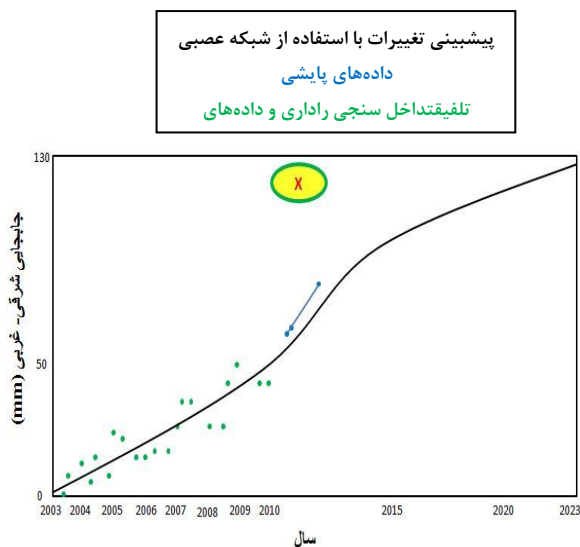
شکل ۸- مقایسه مشخصات میدان سرعت جابجایی بدست آمده. (الف) در راستای شرقی غربی، (ب) در راستای شمالی جنوبی و (ج) در راستای ارتفاعی

در مرحله بعد با استفاده از نرم افزار SNNS، بهترین معماری برای شبکه عصبی مورد استفاده در حل این مساله انتخاب گردید که یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم آموزش پس انتشار خطا و دو لایه میانی است که لایه‌ها به ترتیب از ۲۰۰ و ۶۰ نورون تشکیل شده است. شکل ۹ شبکه عصبی استفاده شده توسط نرم افزار مذکور را نشان می‌دهد.

شکل ۸، دربردارنده این منحنی‌ها می‌باشد. نزدیکی میدان سرعت جابجایی سه‌بعدی بدست آمده از روش تلفیق به داده‌های پایشی موجود از سد نشان‌دهنده نقش این مشاهدات در میدان سرعت جابجایی سه‌بعدی بدست آمده از روش تلفیق است.

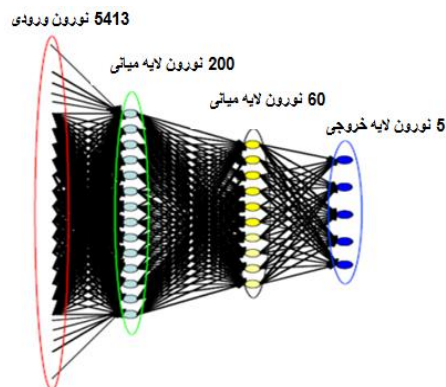






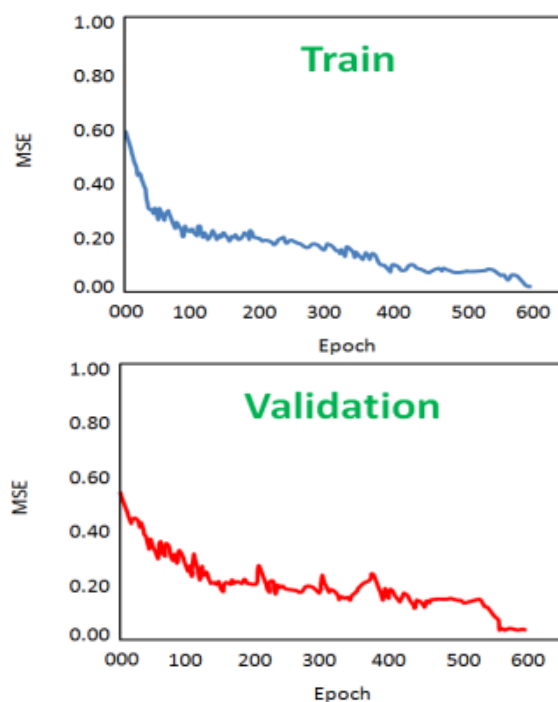
شکل ۱۱- نمودارها نشان دهنده جابجایی‌های بدست آمده از روش تلفیق تداخل‌سنجی راداری و داده‌های پایشی و پیش‌بینی بدست آمده از شبکه عصبی می‌باشند. ضریب همبستگی بین مدل پیش‌بینی و نتایج بدست آمده از روش تلفیق برای نقطه موردنظر در جهت شرقی و شمالی و ارتفاعی به ترتیب ۰/۶۴-۰/۶۲-۰/۷۷ می‌باشد.

RMSE نتایج بدست آمده در راستاهای شرقی، شمالی و ارتفاعی برابر ۷/۸۷-۸/۵۴-۵/۱۲ میلی‌متر می‌باشد. نتایج بدست آمده نمایانگر همبستگی بالای مدل پیش-بینی شده با نتایج بدست آمده از روش تلفیق می‌باشد. با استفاده از مدل پیش‌بینی شده توانستیم تغییر شکل سد



شکل ۹- شبکه عصبی استفاده شده به منظور پیش‌بینی

با استفاده از نمونه‌های آموزش که از تداخل‌نماهای محاسبه شده بوجود آمده بودند و ارزیابی شبکه عصبی در ۷۰٪ آپک آموزش داده شده و با رسیدن خطای ارزیابی به مقدار ثابتی، آموزش شبکه به پایان می‌رسد. شکل ۱۰ نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- منحنی آبی مرحله آموزش و منحنی قرمز مرحله ارزیابی را نشان می‌دهد.

در نهایت با استفاده از نتایج بدست آمده و نرم‌افزار SNNS میزان جابجایی نقطه‌ای در نزدیکی تاج سد را برای سال‌های آینده در ۳ بعد پیش‌بینی نمودیم که نتایج آن در شکل ۱۱ قابل ملاحظه است. جابجایی در تصویر پایه راداری را صفر در نظر گرفته‌ایم و جابجایی‌ها را بصورت نسبی و به مبدا تصویر پایه اندازه‌گیری نموده‌ایم.



دید ماهواره را محاسبه نمودیم سپس با استفاده از روش تلفیق، میدان جابجایی سه بعدی را بدست آوردیم. در مرحله بعد با مقایسه نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری و داده‌های پایشی از صحت نتایج راداری اطمینان یافتیم. بیشترین اختلاف بین نتایج در محل ایستگاه‌ها ۳/۵۹ میلی‌متر بر سال مشاهده گردید. سپس از تداخل‌نماهای بدست آمده به عنوان داده‌های آموزشی استفاده نمودیم و با استفاده از شبکه عصبی که در ۷۰٪ آموزش داده شده و با رسیدن خطای ارزیابی به مقدار ثابتی، نتایج پیش‌بینی جابجایی سازه مورد نظر در نقطه‌ای در بالای سازه در سه بعد و تا سال ۲۰۲۳ بدست آمد.

ضریب همبستگی بین مدل پیش‌بینی و نتایج بدست آمده از روش تلفیق برای نقطه مورد نظر در جهت شرقی و شمالی و ارتفاعی به ترتیب ۰/۶۴-۰/۶۲-۰/۷۷ بدست آمد. علاوه بر این RMSE نتایج بدست آمده در راستاهای شرقی، شمالی و ارتفاعی برابر ۷/۸۷-۸/۵۴-۵/۱۲ میلی‌متر می‌باشد. نتایج بدست آمده نمایانگر همبستگی بالای مدل پیش‌بینی شده با نتایج بدست آمده از روش تلفیق بود. با استفاده از مدل پیش‌بینی شده توانستیم تغییر شکل درودزن را تا سال ۲۰۲۳ پیش‌بینی نماییم. این روش مناسب برای پیش‌بینی تغییر شکل سازه‌های مهندسی می‌باشد که لازم کنترول و جلوگیری از خطرات احتمالی است.

همچنین تطابق بالای نتایج ارزیابی حاصل از مشاهدات ژئودتیک با مدل، نشان دهنده دقت و صحت بالای مدل است.

درودزن را تا سال ۲۰۲۳ پیش‌بینی نماییم. پیش‌بینی صحیح از تغییر شکل و جابجایی سازه مورد نظر نقش حیاتی در جلوگیری از خطرات احتمالی خواهد داشت. همچنین تطابق بالای نتایج ارزیابی حاصل از مشاهدات ژئودتیک با مدل، نشان دهنده دقت و صحت بالای مدل می‌باشد.

## ۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله ما با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی پایش سازه‌های بزرگ مهندسی به بررسی روشی نوین برای این منظور پرداختیم. در این مقاله استفاده از تصاویر راداری را به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و دید وسیع برای این منظور مطرح نمودیم. همچنین برای پایش جابجایی سه بعدی سازه، استفاده از تلفیق تکنیک تداخل-سنجی راداری و داده‌های پایشی موجود از سد را مطرح نمودیم که در قالب روش SISTEM معرفی گردید. در این مقاله ما بحثی را مطرح کردیم که در قالب آن می‌توانیم تغییرات و جابجایی‌های رخ داده بر سازه را با استفاده از شبکه عصبی پیش‌بینی نموده و جابجایی‌های فراتر از حد مجاز را کشف نموده و از خطر جلوگیری نماییم.

سد درودزن فارس به عنوان مورد مطالعاتی این مقاله انتخاب گردید. برای این منظور تعدادی تصویر راداری ماهواره ENVISAT از گذر ۶۳ این ماهواره بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ انتخاب گردید. همچنین از داده‌های پایشی نیز استفاده گردید. ابتدا با استفاده از روش پراکنش کننده‌های دائمی میدان سرعت جابجایی در راستای خط

## مراجع

- [1] Szostak-chrzanowski A, Chrzanowski A, Massiera M, Bazanowski M, and Whitaker C. (2008). Study of a long-term behavior of large earth dam combining monitoring and Finite Element Analysis results. 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering.
- [2] Daniel M, Giuseppe C, Jordi J. M, Sergi D, Paco L-D, Roberto T, Gerardo H, Juan M. L-S, Vicente F, Victor D. N-S, and Joaquín M, (2010). Application of TerraSAR-X data to the monitoring of urban subsidence in the city of Murcia. presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International, Honolulu, HI, pp. 3506-3509.
- [3] Zhang N-n, Chen Z-j, Chen Y-j, and Bian L. (2012). PSI and CRI joint algorithm used to monitor settlements of Sutong bridge foundation. Rock and Soil Mechanics
- [4] Hooper, A., (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophysical Research Letters 35, L16302.
- [5] S. H. Aghajany, B. Voosoghi, Z. Mousavi. Impact of Digital Elevation Models in Accuracy of InSAR Displacement Velocity Fields. JGST. 2015; 4 (4) :123-138

- [6] S. H. Aghajany, B. Voosoghi., A. Yazdian. Estimation of north Tabriz fault parameters using neural networks and 3D tropospherically corrected surface displacement field. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017. doi.org/10.1080/19475705.2017.1289248.
- [7] Zell, A., 1994. *Simulation NeuronalerNetze*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [8] Zell A, Mamier G, Vogt M, Mache N, Hu" bner R, Do" ring S, Herrmann KU, Soyez T, Schmalzl M, Sommer T, Hatzigeorgiou A, Posselt D, Schreiner T, Kett B, Clemente G, Wieland J, (1995). *SNNS, Stuttgart Neural Network Simulator, User Manual, Version 4.1*.