

Sztuczne sieci neuronowe do prognozowania projektowych właściwości nasypu, z warstwą zawierającą cement, pod torowiska kolei dużych prędkości

Artificial neural networks to predict design properties for cemented embankment layers of high speed train rail ways

1. Wstęp

W dzisiejszym świecie coraz modniejszą staje się kolej dużych prędkości. Obecnie Turcja jest jednym z ośmiu krajów świata posiadających infrastrukturę kolei dużych prędkości. Jednocześnie projektowanie nasypów pod torowiska kolei dużych prędkości (KDP) różni się od projektowania nasypów dla zwykłych pociągów ze względu na wysokie wymagania geometryczne i dotyczące właściwości materiałów (1-4, 10, 11). Nasypy projektuje się zakładając bardzo małe wartości równomiernego i nierównomiernego osiadania (1, 11).

Przyjmuje się, że tor kolejowy KDP jest składnikiem złożonej wielowarstwowej konstrukcji inżynierskiej zawierającej różne warstwy o wzrastającej sztywności, od naturalnego gruntu do poziomu szyny (11). Projektowanie wielowarstwowego nasypu wprowadza stopniowy wzrost sztywności od gruntu do najwyższej jego warstwy. Tymi warstwami są pokazane na rysunku 1: naturalny grunt (lub podsypka naturalna), podsypka, podsypka przygotowana, warstwa podstawy nośnej (stosowana w krajach Dalekiego Wschodu) lub podsypka drobno kruszona (stosowana w krajach europejskich), podkład betonowy (stosowany w krajach Dalekiego Wschodu) lub warstwa podsypkowa (stosowana w krajach europejskich), drewniane podkłady i szyny przytwierdzone do podkładów przy użyciu stalowego mocowania.

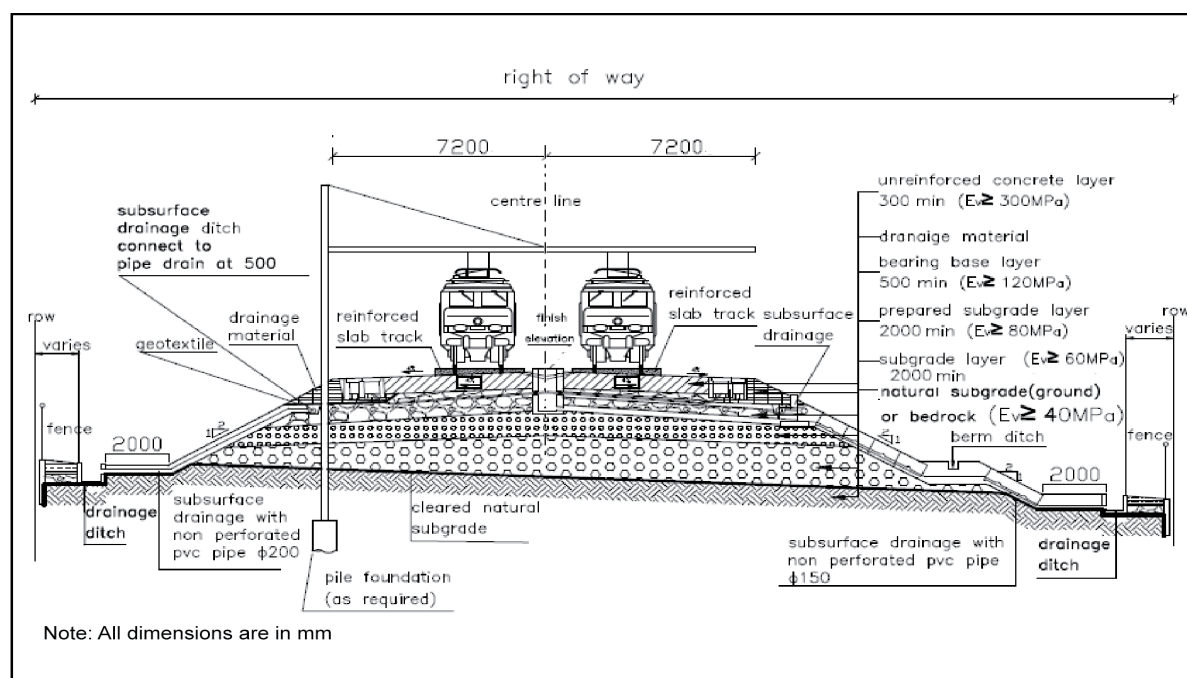
Często w praktyce zdarza się, że dozwolona szerokość terenu, na którym obowiązuje prawo swobodnego przejazdu jest niewystarczająca do zaprojektowania szerokości nasypu ziemnego z nachyleniem 2(H):1(V). W takich przypadkach kupowana jest większa powierzchnia gruntu, co powoduje opóźnienia i wzrost kosztów. Aby uniknąć tych ograniczeń, w niniejszym studium proponuje się zastosowanie cementowanej warstwy nasypowej z bardziej stromymi nachyleniami. Budowę dalekowschodniego podsypkowego rodzaju nasypu KDP rozpatrywano pod kątem badań skutków zastąpienia jednej warstwy podtorza przygotowanej bez użycia cementu (BC) przez warstwę z dodatkiem cementu nazywaną

1. Introduction

High-speed trains are increasingly becoming preferred mode of travel in today's world. Turkey is the eighth country presently in the world having such an infrastructure. However, designing high-speed train railway (HSTR) embankments is different than that of normal trains, as higher geometric standards and material properties are required (1-4, 10, 11). Furthermore, HSTR embankments are designed to meet very small total-differential settlement values (1, 11).

HSTR rail-track is considered to be an engineering unit of multi-layered composite system, comprising of various layers, increasing in stiffness from the natural ground up to the rail level (11). The optimum design of a multi-layered rail track involves a gradual increase in stiffness from the ground up to the top layers of an HSTR embankment. These layers are (Fig.1): natural ground (or natural subgrade layer), subgrade layer, prepared subgrade layer, bearing base layer (used in the Far-Eastern countries) or sub-ballast layer (used in the European countries), slab-track (used in the Far Eastern countries) or ballast layer (used in the European countries), wooden sleepers and rails connected to sleepers with steel fasteners.

In practice, it is often encountered that the allowable width of right of way (ROW) is not sufficient to design the width of earthen embankment with 2(H):1(V) slope. In such cases, more land for ROW is purchased, causing delays and extra costs. Alternatively, in order to overcome these shortcomings, this study proposes to use cemented embankment layer design with steeper slopes. A Far-Eastern 'slab-track' type HSTR embankment profile was considered to investigate replacing of one fill strata called 'Without-Cement-Prepared Subgrade Layer (U-PSL)' with a cemented one called 'C-PSL'. This is the first study, to the knowledge of the authors, in the literature to carry out such work. For this purpose, a series of laboratory experiments, the numerical modeling, and artificial neural network (ANN) predictions were carried out for settlements, stress, strain, and elasticity modulus.



Rys. 1. Typowa budowa nasypu torowiska kolei dużej prędkości stosowanego na Dalekim Wschodzie (1)

Fig. 1. Typical High Speed Train Railway (HSTR) embankment profile used in the Far-East (1)

„ZC”. Autorzy nie spotkali w literaturze prac o tej tematyce i z tego względu uważają, że jest to pierwsze opracowanie na ten temat. W celu rozwiązania tego problemu przeprowadzono serię doświadczeń laboratoryjnych, modelowanie numeryczne i prognozowanie przy użyciu sztucznych sieci neuronowych (SSN) obejmujących wielkości osiadania, wartości naprężeń oraz odkształceń i modułu sprężystości.

2. Właściwości warstwy podsypkowej w nasypie KDP

W dalekowschodniej praktyce projektowania przygotowana warstwa podsypkowa (WP) jest ułożona między warstwą podstawy nośnej i podsypką. Zadaniem warstwy podsypkowej jest minimalizacja odkształceń wyżej położonych warstw, wykonanych metodą robót ziemnych i zapobieganie perkolacji wody do niżej położonych warstw, wykonanych tą samą metodą. Zalecany rozkład uziarnienia materiału otaczającego warstwę podsypkową, z cementem lub bez pokazano w tablicy 1 (6).

Właściwości warstwy podsypkowej można określić stosując metody podane w normach lokalnych, międzynarodowych lub amerykańskich ASTM (1, 5, 11):

- standardowa metoda Proctora (ASTM D 698-00) do oznaczenia największej gęstości w stanie suchym i optymalnej zawartości wilgoci,
- metoda nośności (ASTM D 1196-93, 2004), w której maksymalny rozmiar ziarna jest mniejszy od 100 mm.

Wymagane wartości krytyczne są następujące: względny wzrost gęstości z uwzględnieniem maksymalnej gęstości w stanie suchym (MGS) oznaczony metodą Proctora $\rho_d \geq 95\%$ MGS.

2. Properties of the prepared subgrade layer (PSL) in a HSTR embankment

In the Far-Eastern design practice, the prepared subgrade layer (PSL) is located between the bearing- base layer and the subgrade layer. The function of PSL layer is to minimize the deformation of the earthwork layers above and to prevent percolation of water into the earthwork layers below. Recommended gradation envelope for a PSL (or Without-Cement-PSL or U-PSL) material is given in Table 1 (6).

The properties of the PSL material in question can be defined by some local, international and following ASTM standard tests (1, 5-11):

- Standard Proctor Test (ASTM D 698-00) to determine the maximum dry density, MDD and the optimum moisture content, OMC.
- Plate Bearing Test (ASTM D 1196-93, 2004), where the maximum particle size <100 mm.

Required critical values to be obtained in the used specifications for the above tests are as follows;

- Relative Compaction with respect to maximum dry density (MDD) from the Standard Proctor Test, $\rho_d \geq 95\%$ MDD.
- Vertical Elasticity Modulus from the Plate Bearing Test, $E_v \geq 80$ MPa.

Laboratory Test Results on Without-Cement Turgutlu Sand as U-PSL are given in Table 2 (12).

In cemented tests, Type-1 Portland cement (ASTM C150, 1994) and local Turgutlu sand was used for finding the right mix proportions at two water-cement ratios (0.4, 0.5) and with five cement

Moduł sprężystości pionowej wyznaczony metodą nośności $E_v \geq 80$ MPa.

Wyniki badań laboratoryjnych piasku Turgutlu bez cementu BC podano w tablicy 2 (12).

W badaniach stosowano mieszankę złożoną z cementu portlandzkiego klasy 1 (ASTM C150, 1994) i lokalnego piasku Turgutlu, oraz dwa stosunki w/c 0,4 lub 0,5 i pięć zawartości cementu (10, 15, 20, 25, 30%). W stalowych formach wykonywano cylindryczne próbki o trzech różnych średnicach, wszystkie o tym samym stosunku wysokości do średnicy równym dwa. Po 7 i 28 dniach twardnienia zmierzono wytrzymałość zmęczeniową nieograniczoną próbek, w celu otrzymania ich jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie [norma TS EN 12390-2, 2002; -3, 2003] (5-9). Projektowane właściwości mieszanin podano w tablicy 3 (12).

W Tablicy 4 podano trzy zbiory wyników doświadczalnych próbek o różnej zawartości cementu C (10%, 15%, 20%, 25% i 30%), z dwoma wartościami stosunków w/c (0,4 i 0,5) i dojrzewających przez 7 i 28 dni. Jak wynika z tablicy 4 zaformowano trzy próbki walcowe o małych wymiarach A (średnica $D = 4$ cm i wysokość $H = 8$ cm), trzy próbki o średnich wymiarach B ($D = 8$ cm, $H = 16$ cm) i trzy duże próbki C ($D = 10$ cm, $H = 20$ cm) Do badania wytrzymałości stosowano prasę IYTE-MAM. Po przeprowadzeniu poprawek wybrano do analiz, zarejestrowaną siłę jako naprężenie niszczące.

3. Analiza osiadania nasypu KDP z warstwami podtorza BC i ZC

Termin „osiadanie” odnosi się tutaj do równomiernego i nierównomiernego osiadania „szczytu szyny”, włączając udział naturalnego gruntowego podłoża nasypu (czyli gruntu nienaruszonego) i różnych warstw nasypu powyżej podłoża, ale poniżej podkładów. Układ od przechyłki toru do podstawy podkładu kolejowego jest uważany za bryłę sztywną i na Dalekim Wschodzie jego udział w osiadaniu nasypu jest zaniedbywany.

Tablica 2 / Table 2

LABORATORY TESTS RESULTS OF TURGUTLU SAND WITHOUT CEMENT USED AS U-PSL (12)

WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH PIASKU TURGUTLU BEZ CEMENTU STOSOWANEGO JAKO WARSTWA BC (12)

No	Experiment name	Used method	ASTM-D	Value	Unit
1	Particle size analysis	Wet sieve analysis	ASTM-D 422-63	-	%
2	The laboratory compaction test	Standard proctor method	ASTM-D 698-00	$W_{opt} = 13.6$ $Y_{drymax} = 19.994$	% kN/m ³
3	Specific gravity of soil solids	Pycnometer method	ASTM-D 854-02	2.65	-
4	Determination of water content	Oven dried method	ADTM-D 2216	3.3% in laboratory conditions	%
5	Classification of soil for engineering purposes	USCS	ASTM-D 2487-00	SP	-
6	Coefficient of permeability	Falling head method	ASTM-D 5084-03	10^{-3}	m/sec
7	Maximum index density	Vibration table method	ASTM-D 4253-00	-	-
8	Triaxial compression test	Consolidated-drained (CD)	ASTM WK3821	$c = 7$ $\phi = 37$	kPa, °
9	Direct shear test	Consolidated – drained (CD)	ASTM-D 3080-04	$c = 7$ $\phi = 36.88$	kPa, °

Tablica 1 / Table 1

ZALECANY ROZKŁAD UZIARNIENIA MATERIAŁU OTACZAJĄCEGO WARSTWĘ PODSYPKOWĄ W NASYPIE KDP
RECOMMENDED GRADATION ENVELOPE OF A PREPARED SUBGRADE LAYER (PSL) MATERIAL IN A HSTR EMBANKMENT (1)

Grain size ^(*)	Percentage passing
P(2D)	100
P(Dmax)	100-99
P(D)	99-85
P(D/2)	84-55
P(D/5)	60-31
P(D/10)	49-23
P(D/20)	40-17
P(D/50)	31-11
P(D/100)	22-8
P(D/200)	16-6
P(D/500)	9-3
P(D/1000)	6-2

(*) Note: D = nominal grain size, Dmax = 1.25D, if $D \geq 50$ mm; Dmax = 1.58 D, if $D < 50$ mm.

contents (10, 15, 20, 25, 30%). Then, three different diameter (but all having the same height-to-diameter ratio of two) cylindrical samples were obtained in steel molds to be water cured for 7 and 28 days, before testing them for the unconfined compression tests to obtain their uniaxial compressive strengths (per local standards: TS EN 12390-2, 2002; -3, 2003) (5-9). Design values of the mix are given in Table 3 (12).

Table 4 summarizes 60 sets of experimental data having five different cement contents, C (10%, 15%, 20%, 25%, 30%) with two different water-cement ratios, w/c (0.4 and 0.5) and cured for 7 and 28 days. According to Table 4, three cylindrical specimens were cast for the (small) sample A-size (Diameter, $D = 4$ cm and Height, $H = 8$ cm), three specimens were cast for the (medium) sample B-size (Diameter, $D = 8$ cm, Height, $H = 16$ cm) and three

Odształcenie sprężyste podkładu kolejowego jest podstawową właściwością konstrukcji toru kolejowego. Pozwala na rozkład obciążenia od kół przez szyny do podkładów kolejowych. W rezultacie, jeśli podkład kolejowy oraz leżące pod nim warstwy nasypu kolejowego są zbyt sztywne, to taka sytuacja może powodować większą koncentrację obciążenia wywołującego wyższe ścieranie podsypkowej warstwy kruszywa. A to w konsekwencji może powodować lokalnie różną sztywność i może wiązać się z różnymi odształceniami szyny pod wpływem obciążeń dynamicznych spowodowanych ruchem kół wagonów.

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI JEDNOOSIOWEJ PRÓBY ŚCISKANIA PO 28 DNIOWYM TWARDNIENIU PRÓBEK SPORZĄDZONYCH ZŁOŻONYCH Z PIASKU TURGUTLU Z DODATKIEM CEMENTU STOSOWANYCH JAKO ZC W NASYPIE HSTR (12)

THE RESULTS OF UNIAXIAL COMPRESSION TEST OF THE PREPARED CEMENTED-TURGUTLU SAND SPECIMENS AFTER 28-DAY OF CURING USED AS C-PSL IN HSTR EMBANKMENT (12)

Group	D (cm)	H (cm)	w/c (%)	C (%)	Failure Stress (MPa)	Failure Elasticity (MPa)	Failure Strain (%)
1A	4	8	0.5	15	2,009	42,410	4,736
1B	8	16	0.5	15	2,945	50,460	5,835
1C	10	20	0.5	15	2,008	40,310	4,982
2A	4	8	0.5	20	6,108	103,200	5,919
2B	8	16	0.5	20	8,055	109,460	7,359
2C	10	20	0.5	20	11,870	145,680	8,148
3A	4	8	0.5	10	1,243	25,290	4,916
3B	8	16	0.5	10	1,990	37,030	5,373
3C	10	20	0.5	10	2,669	44,620	5,982
4A	4	8	0.5	25	11,016	205,480	5,361
4B	8	16	0.5	25	15,734	289,850	5,428
4C	10	20	0.5	25	11,017	181,160	6,081
5A	4	8	0.5	30	0,547	271,840	4,788
5B	8	16	0.5	30	0,767	317,590	5,171
5C	10	20	0.5	30	1,121	329,650	5,324
6A	4	8	0.4	15	1,002	18,210	5,201
6B	8	16	0.4	15	1,441	25,480	5,354
6C	10	20	0.4	15	2,519	43,470	5,495
7A	4	8	0.4	20	4,247	92,140	5,109
7B	8	16	0.4	20	5,588	110,510	5,257
7C	10	20	0.4	20	8,920	171,080	5,214
8A	4	8	0.4	10	12,201	11,250	4,960
8B	8	16	0.4	10	14,836	14,790	5,188
8C	10	20	0.4	10	15,902	20,660	5,424
9A	4	8	0.4	25	10,919	232,800	4,690
9B	8	16	0.4	25	12,284	229,000	5,364
9C	10	20	0.4	25	13,126	240,290	5,462
10A	4	8	0.4	30	15,078	313,820	4,805
10B	8	16	0.4	30	17,952	353,470	5,079
10C	10	20	0.4	30	21,208	421,260	5,035

Tablica 3 / Table 3

PROJEKTOWANE WŁAŚCIWOŚCI MIESZANIN PIASKU TURGUTLU Z CEMENTEM, STOSOWANE JAKO WARSTWA BC (12)

DESIGN VALUES FOR THE PREPARED MIXES OF CEMENTED-TURGUTLU SAND USABLE AS C-PSL (12)

No	Name	Value	Unit
1	Slump	70	mm
2	Max size of aggregate	50	mm
3	Mixing water and air content	Depends on w/c	-
4	Water/Cement ratio, w/c	0.4-0.5	-
5	Cement content	10, 15, 20, 25, 30	% by weight of concrete
6	Coarse aggregate content	Depends on w/c	-

specimens were cast for the (large) Sample C-size (Diameter, D = 10 cm, Height, H = 20 cm). For the Unconfined Compression Tests, the Universal Testing Machine at the IYTE-MAM Laboratory was utilized. Area correction was applied and the largest compressive force recorded was taken as the break force and used in the analyses.

3. Analysis of HSTR embankment settlements with U-PSL and C-PSL materials

The term 'settlement' here refers to the total and differential settlements at the 'top of rail', including those contributed by the embankment's natural subgrade base (i.e. the resting ground) and by various embankment layers above the base, but below the sleepers. Since the contribution to settlements between elevations of top of rails and bottom of slab track in the far-east is considered to be as a rigid block it is ignored.

The elastic deformation of the track-bed is an essential characteristic of the conventional rail-track structure. It enables a load distribution to take place from the wheels, via rails, to a number of sleepers. Consequently, if the track bed with its underlying various embankment layers are all too stiff, this situation may cause higher load concentrations causing increased abrasions in the ballast layers gravels. This, in turn, may create locally different stiffness and may yield to differential rail deformations under the rails traffic loads.

It is important to check that occurring long-term (usually 30 years) maximum top of rail settlements are within the tolerable limits. Otherwise excessive settlements may affect the stability and safety of the high-speed trains and their passengers, apart from causing fast condition deterioration in the high speed train wheels and in the other HSTR infrastructure.

Experience in the Far-East has shown that long term maximum tolerable total 'top of rail' settlement (Δz) under a passing wheel load of about 200 kN should be limited to $\Delta z \leq 2.0$ mm for any HSTR embankment in the Far-East, whose design speeds vary between 200 – 400 km/hr (6). If a very stiff ground exists below

Ważne znaczenie ma sprawdzenie czy zachodzące w długim okresie, zazwyczaj 30 letnim, największe osiadanie toru mieści się w granicach tolerancji. W przeciwnym razie nadmierne osiadania może oddziaływać na trwałość i bezpieczeństwo kolei dużych prędkości oraz ich pasażerów, a także przyczynić się do szybkiego niszczenia kół wagonów w pociągu kolei dużych prędkości i innych składników infrastruktury tych kolei.

Doświadczenie zdobyte w krajach Dalekiego Wschodu pokazuje, że długookresowe, maksymalne dopuszczalne równomierne osiadanie pod obciążeniem przejeżdżającego koła wynoszącym około 200 kN powinno być ograniczone do wartości $\Delta z \leq 2.0$ mm dla nasypów KDP, którego projektowana szybkość mieści się w przedziale 200 – 400 km/h (6). Jeżeli pod torem kolejowym występuje bardzo sztywny grunt (np. tor kolejowy na skale lub na moście) sprężyste przemieszczanie się szyn może być tylko wynikiem luźnego połączenia szyna – podkład. Ponieważ maksymalne dopuszczalne sprężyste przemieszczanie się szyn powinno maleć ze wzrastającą szybkością, dopuszczalne maksymalne wartości Δz muszą być kilka razy mniejsze niż sprężyste przemieszczenia, w przypadku jakiegokolwiek toru KDP w porównaniu z pociągami konwencjonalnymi, których szybkości projektowe są mniejsze od 200 km/h (6).

Kryterium (Δs) maksymalnego osiadania toru w długim okresie, zazwyczaj 30 lat po wybudowaniu, jakiegokolwiek nasypu KDP jest prawie takie samo zarówno dla wbudowanej podsypki jak i ubitej warstwy i wynosi $\Delta s \leq 10$ mm na każde 20 m długości nasypu, dla każdej szybkości pociągu w przedziale 200 – 400 km/h (6). Z drugiej strony zgodnie z praktyką projektową Dalekiego Wschodu, która jest zwykle bardziej rygorystyczna niż europejska, kryterium maksymalnego dopuszczalnego poprzecznego osiadania równomiernego i nierównomiernego każdego nasypu KDP lub między dwoma szynami ($\Delta s_{\text{transverse}}$), jest także ograniczone w przypadku takiego samego zakresu szybkości do $\Delta s_{\text{transverse}} \leq 2$ mm (6). W tym zakresie przeprowadziliśmy analizę metodą elementów skończonych w celu sprawdzenia zakresu osiadania podsypki ZC.

4. Analiza osiadania nasypu KDP

Stosując program Plaxis V8 (2D) FEM przeprowadzono analizę modelu osiadania nasypu kolei dużych prędkości z zastosowaną

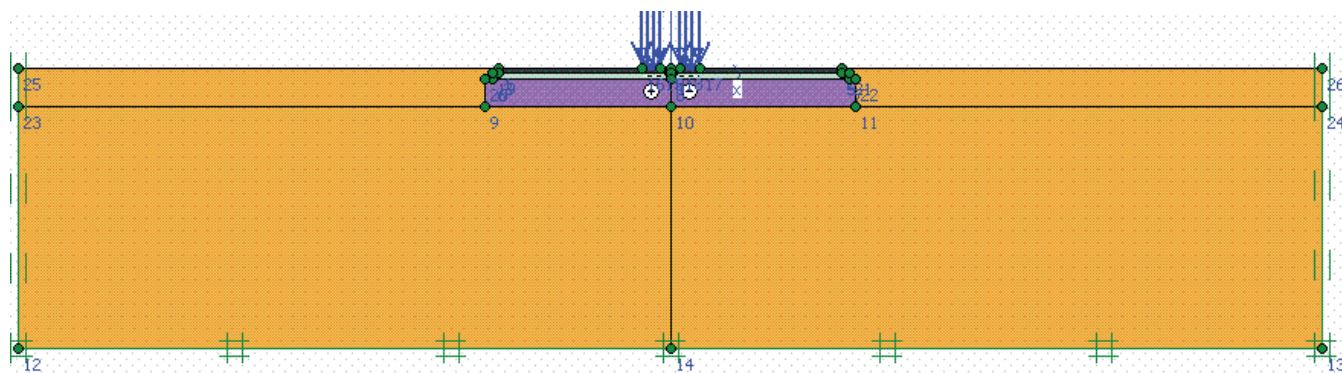
a track bed (e.g. track-bed on rock or on a bridge) the elastic displacements at the 'top of rail' may result only from the loose rail-sleeper connections itself. As the maximum allowable elastic 'top of rail' displacements should decrease with increasing speed, the allowable maximum values of Δz should be few times smaller for any HSTR track than those for the conventional trains whose design speeds are less than 200 km/hr (6).

The criteria for the top of rails maximum settlement value (Δs) in the long term of usual 30 years after construction of any HSTR embankment is almost the same for both the 'ballasted' and 'slap-track' cases as being $\Delta s \leq 10$ mm for any 20m long longitudinal section of the HSTR embankment for any HST traveling between 200 – 400 km/h (6). On the other hand, according to Far-Eastern design practice (which is usually stricter than the European ones), the criteria for the maximum tolerable total and differential settlements in the lateral (transverse) direction of any HSTR embankment or in-between the two rails ($\Delta s_{\text{transverse}}$), is also be limited for the same speed range to; $\Delta s_{\text{transverse}} \leq 2$ mm (6). In the following, we carried out the FEM analysis to check the settlement limits for the C-PSL.

4. Settlement analysis of an HSTR embankment

In this section, high speed train embankment with C-PSL modeling and settlement analysis is done using the Plaxis V8 (2D) FEM program. The modeling procedure is explained as follows:

- 1) Firstly, high speed train embankment is modeled as shown in Fig. 2.
- 2) As there are four different HSTR embankment layers above the natural subgrade layer, namely; (unreinforced)slab-track layer, bearing-base layer, 2 m thick Without-Cement-prepared subgrade layer (U-PSL) and (artificial) subgrade layer (Fig. 1), all of these layers have different material properties. Thus, such individual layer properties and test conditions should be separately considered and introduced into the Plaxis-FEM Program. It is noted that for simplicity, the ground water table (GWT) is considered to exist below the bottom of the HSTR embankment, which is also called foundation level, or the natural subgrade level. Due to capillarity phenomena, GWT level may rise in the embankment, whose curved surface is



Rys. 2. Przyjęty do obliczeń model nasypu KDP

Fig. 2. Adopted HSTR embankment model [12]

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE UŻYTE W MODELU NASYPU KDP (12)

MATERIAL PROPERTIES OF THE ADOPTED HSTR EMBANKMENT MODEL (12)

Parameter	Name	Unit	Slab track layer	Bearing base layer	Prepared subgrade layer	Subgrade layer
Material model	Model	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Type of material behaviour	Type	-	Drained	Drained	Drained	Drained
Soil unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	kN/m ³	19	18	17	16
Soil unit weight below phreatic level	γ_{sat}	kN/m ³	22	21	20	19
Permeability in horizontal direction	k_x	m/sec	0.2	0.03	0.001	0.00001
Permeability in vertical direction	k_y	m/sec	0.2	0.03	0.001	0.00001
Young's modulus	E_{ref}	kPa	300000	120000	80000 ^(*)	60000
Poisson's ratio	ν	-	0.40	0.35	0.30	0.2
Cohesion	c_{ref}	kPa	1	1.5	7	5
Friction angle	ϕ	°	40	38	37	35
Dilatancy angle	ψ	°	-	-	2	-

^(*)Note: This 80 MPa value is for the uncemented prepared subgrade layer: U-PSL.

^(*) Uwaga: 80 MPa przyjęto dla przygotowanej warstwy podsypki podtorza (BC)

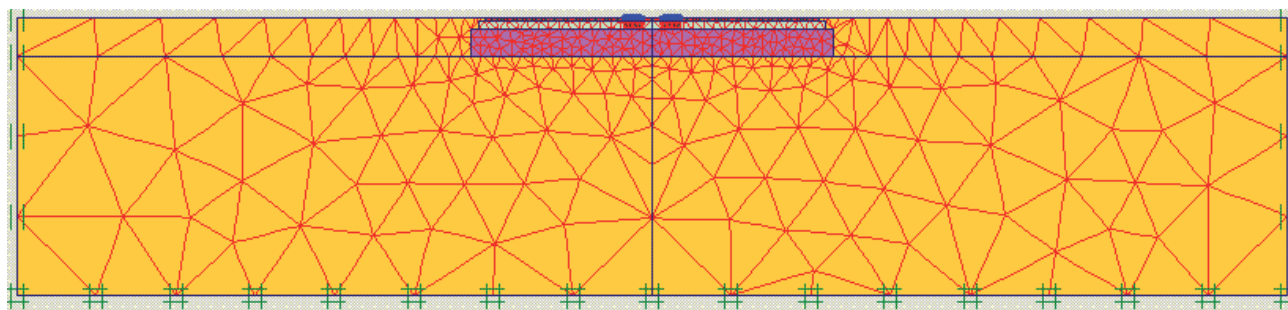
warstwą podtorza z podsypki ZC. Przebieg modelowania był następujący:

- 1) Model nasypu kolei dużych prędkości jest pokazany na rysunku 2.
- 2) Nasyp zbudowany jest z czterech różnych warstw położonych ponad podsypką naturalną, a mianowicie: niezbrojonego podkładu betonowego, warstwy podstawy nośnej, warstwy podsypki BC podtorza o grubości 2 m oraz sztucznej podsypki, wszystkich pokazanych na rysunku 2. Te wszystkie warstwy mają różne właściwości. Dlatego charakterystyczne właściwości poszczególnych warstw i warunki ich badania powinny być oddzielnie określone i wprowadzane do programu Plaxis-FEM. Dla uproszczenia przyjmuje się, że poziom wód gruntowych (PWG) znajduje się poniżej podstawy nasypu KDP, która jest także nazywana poziomem podbudowy lub poziomem posypki naturalnej. Pod wpływem podciągania kapilarnego wody gruntowe mogą wnikać do nasypu, którego zakrzywiona powierzchnia jest nazywana „powierzchnią nasycenia, PN”. Powyżej i poniżej tej powierzchni właściwości gruntu w stanie „nienasycenia” i „nasycenia” powinny być zastosowane w obliczeniach. Właściwości poszczególnych warstw nasypu KDP, które zastosowano w analizie osiadania podano w tablicy 5.

called the 'phreatic surface, PS'. Above and below the PS, 'unsaturated' and 'saturated' soil properties should be used, respectively. Material properties of the individual layers in an HSTR embankment to be used in the FEM settlement analysis are given in Table 5.

- 3) Then a finite element mesh is generated for the HSTR embankment model used (Fig. 3).

When the initial conditions are assessed and entered into the Plaxis-FEM program, then analyses could begin. Analyses were made for using seven different elasticity moduli values (belonging to one value for each layer) in the HSTR Embankment. One of them is for the U-PSL elasticity modulus value of 80 MPa and the other six values are for the laboratory obtained C-PSL elasticity moduli values. The other variables used were; two water-to cement ratios ($w/c = 0.4, 0.5$) and three cement contents ($C = 20, 25, 30\%$). Tests done for the lower cement contents of 10% and 15% were discounted, as they did not meet the criteria of equaling or exceeding the required minimum 80 MPa elasticity modulus value of any Without-Cement-prepared subgrade layer (U-PSL). Laboratory obtained results are presented in Table 6.



Rys. 3. Triangulacja obszaru w modelu nasypu KDP (12)

Fig. 3. Finite element mesh used for the HSTR embankment model (12)

Tablica 6 / Table 6

ZMIENNOŚĆ MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI WARSTWY PODTORZAZ PODSYPKI Z CEMENTEM ZC W FUNKCJI STOSUNKU W/C I ZAWARTOŚCI CEMENTU C(%) ORAZ ICH PORÓWNANIE Z WYMAGANYM MINIMUM $E_v=80$ MPA DLA WARSTWY PODTORZA BC (12)

VARIATION OF C-PSL ELASTICITY MODULI WITH W/C RATIOS AND CEMENT CONTENT, C (%) AND THEIR COMPARISON WITH THE MINIMUM REQUIRED $E_v=80$ MPA OF U-PSL (12)

w/c	Elasticity modulus, E (MPa)		
	Cement content, C (%)		
	20	25	30
0.5	258.94	261.46	450.47
0.4	352.86	545.20	597.48

3) Generowana jest siatka dla przyjętego modelu nasypu KDP pokazanego na rysunku 3

Analizę można rozpocząć po zdefiniowaniu i wprowadzeniu warunków początkowych do programu Plaxis-FEM. Obliczenia przeprowadzono przyjmując siedem wartości modułu sprężystości (przyporządkowując jedną wartość do każdej warstwy) w nasypie KDP. Jedną z nich jest modułem sprężystości warstwy podtorza z przygotowanej podsypki BC wynoszącej 80 MPa, a inne sześć wartości uzyskano z pomiarów laboratoryjnych modułu sprężystości warstwy podtorza z przygotowanej podsypki z dodatkiem cementu ZC. Inne zmienne zastosowane w obliczeniach były następujące: dwa w/c wynoszące 0,4 i 0,5 oraz trzy udziały cementu 20%, 25% i 30%. Wyniki badań obejmujące mniejsze zawartości cementu 10% i 15% pominięto, gdyż osiągnięte wartości nie spełniały kryterium modułu sprężystości, który musi być równy lub przekraczać 80 MPa, właściwą dla przygotowanej bez dodatku cementu podsypki warstwy podtorza (BC). Wyniki badań laboratoryjnych podano w tablicy 6.

Są dwa ogólne modele obciążenia szyny stosowane w obliczeniach skutków obciążenia statycznego, określone w normie EN 1991-2: Eurocode 1 (2), w której obciążenie szyny podczas ruchu jest zdefiniowane za pomocą modeli nacisku kół na szynę. Zamiast Modelu Nacisku 71 z odległością (1) nie podlegającą ograniczeniu, ale zwykle przyjmowaną jako 21,5 m, pokazaną na rysunku 4 i w tablicy 7, zastosowano Model Nacisku SW/0 bardziej rygorystyczny w stosunku do poprzedniego (to jest dający większą wartość osiadania) do zobrazowania wpływu statycznego obciążenia pionowego powodowanego normalnym ruchem kolejowym na nasypach magistrali kolejowej, pokazany na rysunku 5 i w tablicy 7.

Typowa odległość "a" pokazana na rysunku 5 jest zawarta w tablicy 7.

Ostatecznie osiadanie równomierne obliczono wykorzystując program Plaxis-FEM z sześcioma różnymi wartościami modułu sprężystości wyznaczonymi w badaniach laboratoryjnych dla podtorza ZC, co pokazano w tablicy 6, a wyniki porównano z wartością minimalną $E_v=80$ MPa dla podtorza BC. Wszystkie otrzymane wartości osiadania mieszczą się w przedziałach granicznych, poka-

TABLICA 7 / TABLE 7

CHARACTERISTIC VALUES USED FOR THE LOAD MODELS: SW/0 AND 71 (2)

TYPOWE WARTOŚCI STOSOWANE W MODELACH OBCIĄŻENIA: SW/0 I 71 (2)

Load Model	q_{vk} [kN/m]	a [m]	c [m]	(1) [m]
SW/0	133	15.0	5.3	-
71	-	-	-	21.5

For the loading; two general models exist for calculation of the associated static loading effects by EN 1991-2: Eurocode 1 (2), where the rail traffic loading is defined by means of load models. Rather than Load Model 71 with distance (1) having no limitation, but usually taken as 21.5 m, (Fig.4, Table 6), a more critical (i.e. higher settlement giving) Load Model SW/0 was used to represent the static effect of vertical loading, due to normal rail traffic on the mainline railway embankments (Fig.5, Table 7).

The characteristic distance 'a' of Figure 5 is given in Table 7.

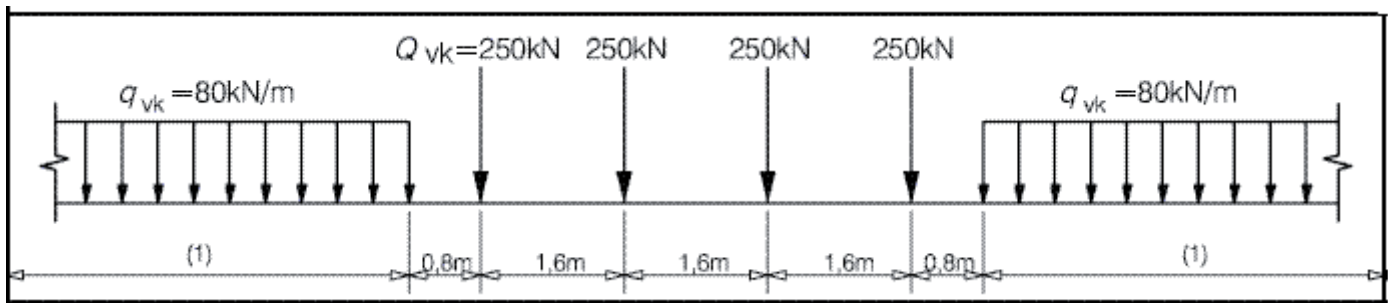
Finally, total settlements were calculated by using the Plaxis-FEM Program with six different laboratory obtained elasticity moduli values of the C-PSL, as listed in Table 6 and results were compared with that of the minimum $E_v=80$ MPa value of the U-PSL. All settlement values obtained were within the limiting values given in Table 8. According to Table 8, when C-PSL is not used, the settlement criterion is almost reached. However, when C-PSL is used, the settlements are comfortably below the limit (1) (Table 8).

5. Artificial neural networks (ANNs) to predict stress, strain, and stiffness in the design of a C-PSL in an HSTR embankment

The applications of ANN generally consider a three-layer feed-forward network, as shown in Fig. 6. In a feedforward ANN, the input quantities (x_i) are fed into the input layer neurons that, in turn, pass them on to the hidden layer neurons (z_i) after multiplication by connection weights (v_{ij}) (Fig. 6). A hidden layer neuron adds up the weighted input received from each input neuron ($x_i v_{ij}$) and associates it with a bias (b_j) (i.e. $net_j = \sum x_i v_{ij} - b_j$). The result (net_j) is then passed on through a non-linear transfer function to produce an output. The learning of ANNs is generally accomplished by the most commonly used supervised training algorithm of the back-propagation algorithm. The objective of the back propagation algorithm is to find the optimal weights that would generate an output vector $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ as close as possible to the target values of the output vector $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_p)$ with the selected accuracy.

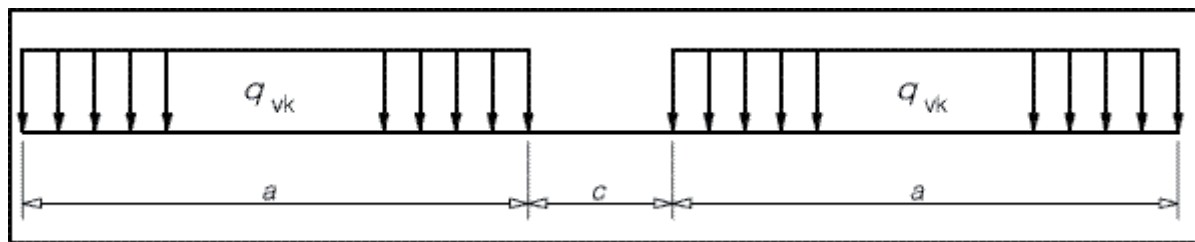
The optimal weights are found by minimising a predetermined error function (E) of the following form (ASCE Task Committee, 2000a):

$$E = \sum_P \sum_p (y_i - t_i)^2 \quad [1]$$



Rys. 4. Model obciążenia 71 i obciążenia pionowe w kierunku wzdłużnym nasypu KDP (12)

Fig. 4. Load Model 71 and vertical loads in the longitudinal direction of a HSTR embankment (2)



Rys. 5. Model obciążenia SW/0 i pionowe obciążenia w kierunku wzdłużnym nasypu KDP (2)

Fig. 5. Load Model SW/0 and vertical loads in the longitudinal direction of HSTR embankment (2)

zanych w tabelicy 8. Jak wynika z tabelicy 8, pomimo że nie stosuje się warstwy podtorza ZC kryterium osiadania jest nieomal spełnione. Jednakże, gdy przygotowana warstwa podtorza zawiera dodatek cementu ZC osiadanie jest znacznie mniejsze od wartości dopuszczalnych (1), na co wskazują wyniki zawarte w tabelicy 8.

5. Sztuczne sieci neuronowe (SSN) zastosowane do prognozowania naprężeń, odkształceń i sztywności w przypadku warstwy podtorza ZC w konstrukcji nasypu KDP

Generalnie w przypadku sztucznej sieci neuronowej (SSN) stosuje się sieć trójwarstwową, w której połączenia między jednost-

where, y_i = the component of an ANN output vector \mathbf{Y} ; t_i = the component of a target output vector \mathbf{T} ; p = the number of output neurons; and P = the number of training patterns.

In the back propagation algorithm, the effect of the input is first passed forward through the network to reach the output layer. After the error is computed, it is then propagated back towards the input layer with the weights being modified. The gradient-descent method, along with the chain rule of differentiation, is employed to modify the network weights as (ASCE Task Committee, 2000a):

$$\Delta v_{ij}(n) = -\delta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} + \alpha \Delta v_{ij}(n-1) \quad [2]$$

Tabela 8 / Table 8

WYNIKI ANALIZY OSIADANIA RÓWNOMIERNEGO W PRZYPADKU WARSTWY PODTORZA ZC O GRUBOŚCI 2 M, ZASTOSOWANEJ ZAMIAST WARSTWY BC, W TYPOWYM NASYPIE KDP (12)

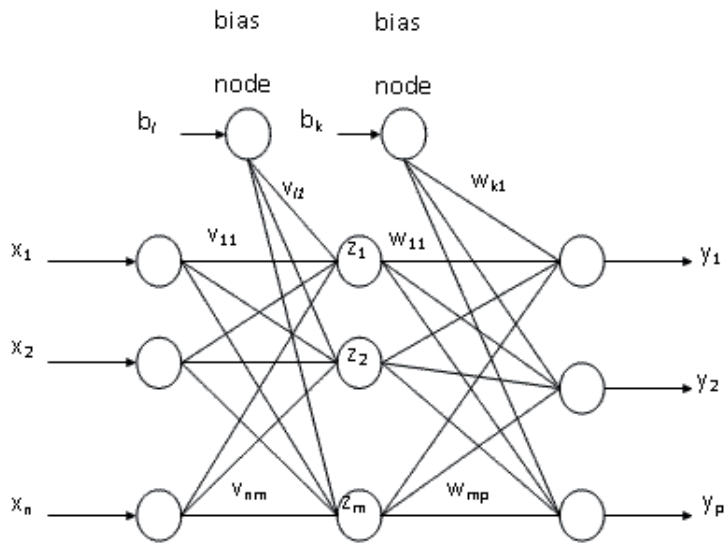
TOTAL SETTLEMENT ANALYSES RESULTS FOR A 2 M THICK C-PSL, IF USED INSTEAD OF A 2M THICK U-PSL IN A TYPICAL HSTR EMBANKMENT (12)

Layers	U-PSL	C-PSL						ASV ^(*) mm	Notes
	ΔS_1 E=80 MPa mm	ΔS_2 w/c=0.4 C=20% E=352.9MPa mm	ΔS_3 w/c=0.4 C=25% E=545.2MPa mm	ΔS_4 w/c=0.4 C=30% E=597.5MPa mm	ΔS_5 w/c=0.5 C=20% E=258.9MPa mm	ΔS_6 w/c=0.5 C=25% E=261.5MPa mm	ΔS_7 w/c=0.5 C=30% E=450.5MPa mm		
Ballast	1.993	0.401	0.253	0.231	0.552	0.542	0.309	<2	OK
Subballast	1.986	0.391	0.247	0.225	0.540	0.531	0.303	<2	OK
Prepared Subgrade	1.875	0.377	0.240	0.219	0.518	0.512	0.293	<2	OK
Subgrade	1.598	0.345	0.219	0.197	0.475	0.467	0.268	<2	OK

^(*)Note: ΔS_i -Plaxis-FEM calculated Total Settlement Values; ASV-Allowable Total Settlement Value.

^(*) Uwaga: D = nominalny rozmiar ziarna, $D_{max} = 1,25 D$, jeżeli $D \geq 50$ mm; $D_{max} = 1,58D$, jeżeli $D < 50$ mm.

^(*) Uwaga: ΔS_i - wartości osiadania równomiernego obliczone za pomocą programu Plaxis-FEM, ΔS_V – dopuszczalna wartość osiadania równomiernego.



Rys. 6. Schemat sztucznej sieci neuronowej trójwarstwowej, w której połączenia między jednostkami nie tworzą skierowanego cyklu (SSN)

Fig. 6. Schematic representation of a Three-Layer Feed-Forward Artificial Neural Network (ANN)

kami nie tworzą skierowanego cyklu, jak to pokazano na rysunku 6. W takiej SSN wielkości wejściowe (x_i) są dostarczane do wejściowej warstwy neuronów, która kolejno propaguje je do ukrytej warstwy neuronów (z_j) po przemnożeniu przez powiązaną wagę (v_{ij}), co jest pokazane na rysunku 6. Neuron warstwy ukrytej scala ważone wejścia otrzymane od każdego neuronu wejścia ($x_i v_{ij}$) i łączy z bitem, czyli dodatkowym wejściem, na którym występuje stała wartość (czyli $net_j = \sum x_i v_{ij} - b_j$). Wówczas wynik (net_j) jest przetwarzany przez nieliniową funkcję aktywacji generującą wynik. Uczenie SSN jest zazwyczaj prowadzone przy wykorzystaniu powszechnie stosowanej metody, z zastosowaniem algorytmu wstecznej propagacji błędów. Celem algorytmu wstecznej propagacji błędów jest znalezienie optymalnych wag synaptycznych pozwalających na otrzymanie wektora wyjścia $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ o wartościach najbliższych wartościom pożądanym wektora wyjścia $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_p)$ z założoną dokładnością.

Wagi optymalne są obliczane przez minimalizację z góry określonej funkcji celu (E) o następującej postaci (ASCE Task Committee 2000a):

$$E = \sum_p \sum_i (y_i - t_i)^2 \quad [1]$$

gdzie: y_i jest współrzędną wektora wyjścia sztucznej sieci neuronowej \mathbf{Y} , t_i żądaną współrzędną wektora wyjścia \mathbf{T} , p liczbą neuronów wyjścia i P liczbą wzorców uczących.

W algorytmie wstecznej propagacji błędów wynik wejścia jest najpierw propagowany przez sieć do warstwy wyjściowej. Po tym obliczany jest błąd, który następnie przepływa w kierunku warstwy wejściowej co pozwala na aktualizację wartości wag. Metoda największego spadku gradientu wraz z twierdzeniem o pochodnej

where, $\Delta v_{ij}(n)$ and $\Delta v_{ij}(n-1)$ = the weight increments between node i and j during the n th and $(n-1)$ th pass or epoch; δ = the learning rate; and α = the momentum factor.

The details of the theory of ANNs are given in (13). In this study, three layer feed forward ANN is constructed for predicting strain, stress, and elasticity. Figure 7 shows the constructed ANNs for the three cases where the input vector is the same for each case. Only the output variable is different that is being stress, strain, or elasticity modulus. 42 sets of data were used for training the network, 18 sets were used for testing it. Table 9 summarizes the employed parameters when training the network for each case, namely stress, strain, and elasticity modulus.

5.1. Stress prediction

During the training as the epoch number increases, the error is initially supposed to decrease sharply and then flatten out. Figure 8 presents the trend of the error function and Table 10 gives the model performance for the training stage, when predicting stress. These results indicate that the training is successfully accomplished.

Figure 9 presents model prediction performance for the testing data and Table 11 shows the model performance results. As seen in Figure 9 and Table 11, ANN performed satisfactorily in predicting stress values with MAE = 2.28 (MPa) and R = 0.96.

Figure 10 shows the sensitivity of the input parameters. According to Fig. 10, cement ratio is the most sensitive one, followed by the sample dimensions for the stress prediction.

5.2. Strain prediction

Figure 11 presents the trend of the error function and Table 12 gives the model performance for the training stage, when predicting strain data.

Figure 12 presents model prediction performance for the testing data and Table 13 shows the model performance results. As seen in Figure 12 and Table 13, ANN performed satisfactorily in predicting strain values with MAE = 0.31 (%) and R = 0.98.

Figure 13 shows the sensitivity of the input parameters when predicting strain by the ANN. According to this figure, age is the most sensitive one, followed by the other parameters.

5.3. Elasticity modulus prediction

Figure 14 presents the trend of the error function and Table 14 gives the model performance for the training stage.

funkcji złożonej jest stosowana do aktualizacji wag synaptycznych według wzoru (ASCE Task Committee, 2000a):

$$\Delta v_{ij}(n) = -\delta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} + \alpha \Delta v_{ij}(n-1) \quad [2]$$

gdzie $\Delta v_{ij}(n)$ i $\Delta v_{ij}(n-1)$ są przyrostami wag między węzłem i i j w związku z modyfikacją wag między n -tym i $(n-1)$ krokiem lub epoką; δ współczynnikiem uczenia, α współczynnikiem momentum.

Szczegóły teorii SSN są zawarte w literaturze ASCE Task Committee (2000a).

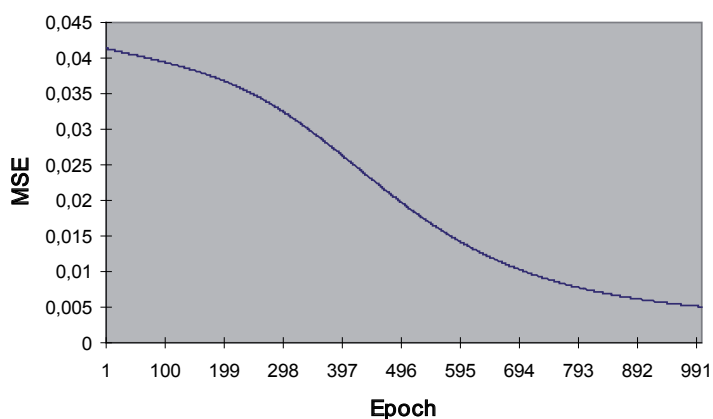
W badaniach wykorzystano trójwarstwową sieć jednokierunkową do prognozowania odkształcenia, naprężenia i sprężystości. Na rysunku 7 pokazano architekturę zastosowanej SSN w wymienionych przypadkach badań przy tym samym wektorze wejściowym. Jedynie zmienna wyjściowa jest różna, gdyż są to prognozowane wartości odkształcenia, naprężenia i modułu sprężystości. Zastosowano 60 ciągów uczących, 30 ciągów testujących. W tabeli 9 zawarto parametry użyte do uczenia sieci w przypadku każdej prognozowanej wielkości, a mianowicie naprężenia, odkształcenia i modułu sprężystości.

5.1. Prognoza wartości naprężenia

Wraz ze wzrostem liczby epok podczas uczenia sieci początkowo można się spodziewać szybkiego spadku błędu sieci, a później spadku wolniejszego. Na rysunku 8 przedstawiono krzywą funkcji błędu, a w tabelicy 10 podano efektywność etapu uczenia sieci do prognozowania wartości naprężenia. Wyniki wykazują, że uczenie sieci zostało w pełni osiągnięte.

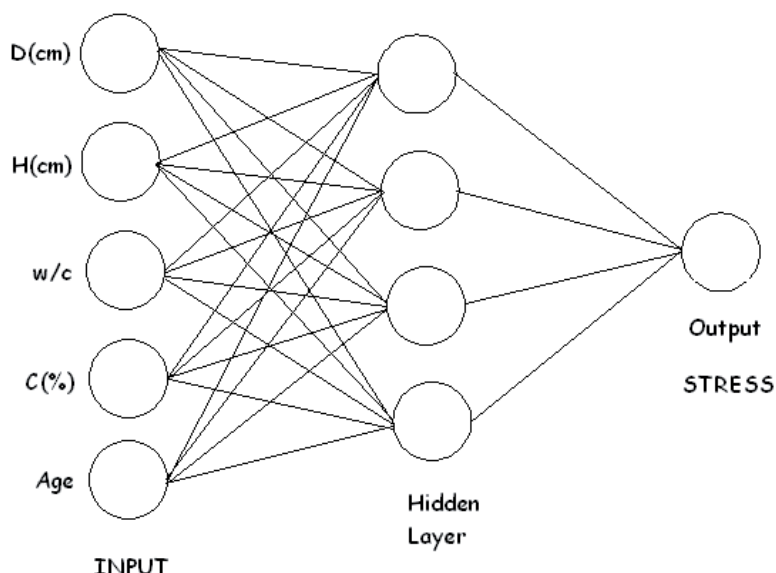
Na rysunku 9 przedstawiono efektywność ciągów testowych, a w tabelicy 11 wyniki efektywności modelu. Jak widać z rysunku 9 i tabelicy 11 efektywność prognozowania naprężenia przez SSN jest zadawalająca. Wartość średniego błędu bezwzględnego wynosi 2,28 (MPa), a współczynnik determinacji $R^2 = 0,96$.

MSE versus Epoch



Rys. 8. Krzywa wartości błędu (średni kwadrat błędu) na etapie uczenia

Fig. 8. Error trend during the training stage



Rys. 7. SSN do prognozowania naprężenia.

Fig. 7. ANN for stress prediction

Tablica 9 / Table 9

PARAMETERS USED IN THE NETWORK FOR STRESS PREDICTION
PARAMETRY SSN DO PROGNOZOWANIA WARTOŚCI NAPRĘŻENIA

Parameters / Parametry	ANN / SSN
Number of input layer neurons Liczba neuronów warstwie wejściowej	5
Number of hidden layer/ Liczba warstw ukrytych	1
Number of hidden layer neurons Liczba neuronów warstwy ukrytej	4
Number of output layer neuron Liczba neuronów warstwy wyjściowej	1
Learning rate / Współczynnik uczenia	0,1
Momentum rate / Współczynnik momentum	0,7
Error after learning / Błąd uczenia	0,001
Learning cycle	1000

Figure 15 presents model prediction performance for the testing data. Table 15 shows the model results for the testing period for the elasticity modulus (E_c) prediction. As seen in Figure 16 and Table 15, ANN performed satisfactorily in predicting elasticity modulus values with MAE = 139.2 (MPa) and $R = 0.95$.

Figure 16 shows the sensitivity of the input parameters when predicting elasticity moduli by the ANN. According to Fig. 16, cement content ratio is the most sensitive one, followed by the sample dimensions and water content.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki analizy wrażliwości badanego naprężenia w zależności od wielkości wejściowych. Jak wynika z rysunku 10 zawartość cementu ma największy wpływ na wartość naprężenia, a w dalszej kolejności wymiary próbki.

5.2. Prognoza wartości odkształcenia

Na rysunku 11 pokazano krzywą funkcji błędu, a w tabelicy 10 podano skuteczność etapu uczenia sieci prognozowania wartości odkształcenia.

Table 10 / Tablica 10

WYNIK KOŃCOWEGO ETAPU UCZENIA SIECI DO PROGNOZOWANIA NAPRĘŻENIA

TRAINING SUMMARY RESULTS FOR STRESS PREDICTION

Best Network / Najlepsza sieć	Training / Uczenie
Epoch / Liczba epok	1000
Minimum MSE / Minimalny średni kwadrat błędu	0,0051
Final MSE/ Wartość końcowa	0,0051

Tablica 11 / Table 11

EFEKTYWNOŚĆ SSN NA ETAPIE TESTOWANIA

ANN PERFORMANCE FOR THE TESTING PERIOD

(MSE – średni kwadrat błędu, NMSE – znormalizowany średni kwadrat błędu, MAE – średni błąd bezwzględny, Min Abs Error – minimalny błąd bezwzględny, Max Abs Error – maksymalny błąd bezwzględny, R² współczynnik determinacji)

Performance / Efektywność	Stress / Naprężenie
MSE	8,91
NMSE	0,20
MAE	2,28
Min Abs Error	0,40
Max Abs Error	8,45
R ²	0,96

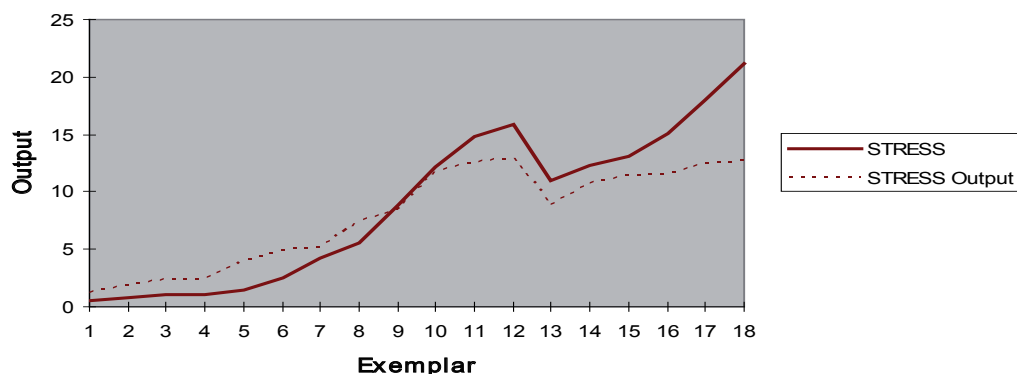
Tablica 12 / Table 12

WYNIKI KOŃCOWE ETAPU UCZENIA SIECI PROGNOZOWANIA ODKSZTAŁCENIA

TRAINING SUMMARY RESULTS FOR STRAIN PREDICTION

Best Network / Najlepsza sieć	Training / Uczenie
Epoch #/Liczba epok	1000
Minimum MSE/Minimalny średni kwadrat błędu	0,011
Final MSE/ Wartość końcowa	0,011

Desired Output and Actual Network Output



Rys. 9. Prognoza SSN mierzonych wartości naprężenia na etapie testowania

Fig. 9. ANN prediction of measured stress values for the testing stage

Tablica 13 / Table 13

EFEKTYWNOŚĆ SSN PODCZAS POMIARÓW

ANN PERFORMANCE FOR THE TESTING PERIOD

Performance / Efektywność	Strain / Odształcenie
MSE	0,12
NMSE	2,23
MAE	0,31
Min. Abs. Error	0,065
Max. Abs. Error	0,52
R	0,98

Tablica 14 / Table 14

WYNIKI KOŃCOWE PODCZAS UCZENIA SIECI DO PROGNOZOWANIA MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI

TRAINING SUMMARY RESULTS FOR ELASTICITY MODULUS PREDICTION

Best Network / Najlepsza sieć	Training / Uczenie
Epoch #/Liczba epok	1000
Minimum MSE/Minimalny średni kwadrat błędu	0,014
Final MSE/ Wartość końcowa	0,014

Table 15 / Table 15

ANN PERFORMANCE FOR THE TESTING PERIOD

EFEKTYWNOŚĆ SSN PODCZAS TESTOWANIA

Performance / Efektywność	Elasticity Moduli Moduł sprężystości
MSE	34000,5
NMSE	0,58
MAE	139,2
Min Abs Error	3,65
Max Abs Error	472,0
R	0,95

Na rysunku 12 pokazano prognozowane wartości mierzonych naprężeń, a w tabelicy 13 wyniki uzyskane za pomocą modelu. Jak wynika z rysunku 12 i tabelicy 13 skuteczność prognozowania naprężenia przez SSN była zadawalająca. Wartość średniego błędu bezwzględnego wynosi 0,31 (%), a współczynnik determinacji $R^2 = 0,98$.

Na rysunku 13 przedstawiono wyniki analizy czułości badanego okształcenia w zależności od wielkości wejściowych. Jak wynika z rysunku 13 czas wiązania ma największy wpływ na wartość okształcenia, a w dalszej kolejności inne parametry.

5.3. Prognoza wartości modułu sprężystości

Na rysunku 14 pokazano krzywą funkcji błędu, a w tabelicy 14 podano efektywność etapu uczenia sieci stosowanej do prognozowania wartości modułu sprężystości.

Na rysunku 15 przedstawiono efektywność prognozowania za pomocą modelu złożonego z ciągów pomiarowych, a w tabelicy 15 wyniki uzyskane za pomocą modelowej prognoz wartości modułu elastyczności (E_v) podczas uczenia. Jak widać z rysunku 16 i tabelicy 15 efektywność prognozowania wartości modułu sprężystości przez SSN jest zadawalająca. Średni błąd bezwzględny prognozowanej wartości modułu sprężystości wynosi 139,2(MPa), a współczynnik determinacji $R^2 = 0,95$.

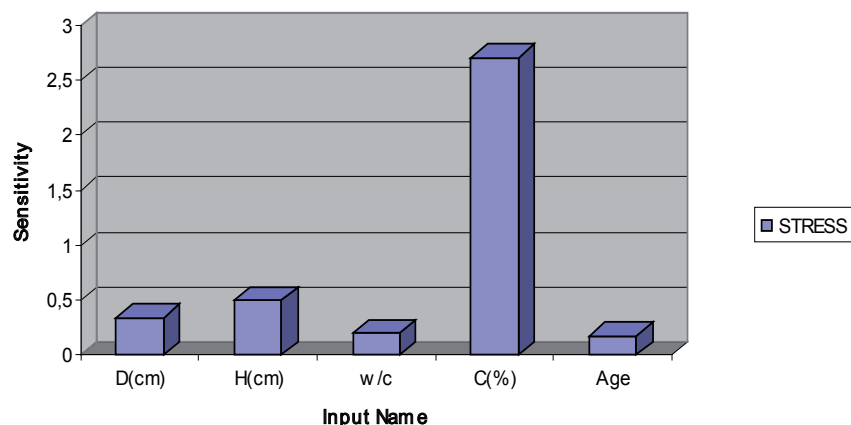
Na rysunku 16 przedstawiono wyniki analizy skuteczności badanego modułu sprężystości w zależności od wielkości wejściowych. Jak wynika z rysunku 16 zawartość cementu ma największy wpływ na wartość modułu sprężystości, a w dalszej kolejności wymiary próbki i stosunek w/c.

6. Wnioski

Uzyskane wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Analiza przeprowadzona przy zastosowaniu metody elementów skończonych wykazała, że tylko trzy mieszaniny warstwy

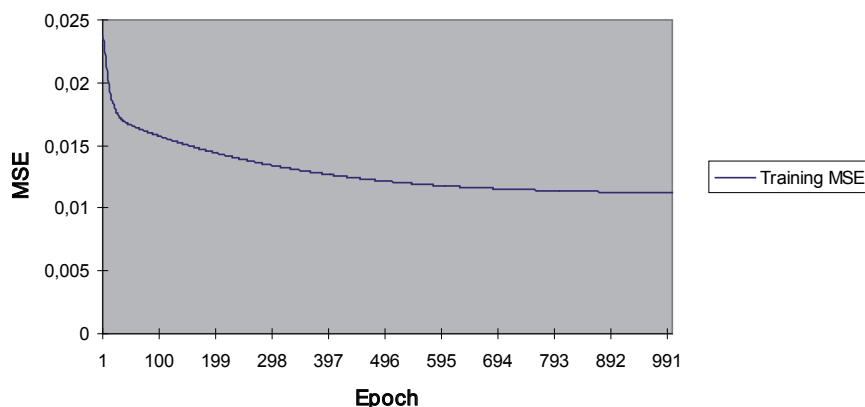
Sensitivity About the Mean



Rys. 10. Analiza wrażliwości wpływu parametrów próbki betonowej na wartość naprężenia prognozowanego przez SSN

Fig. 10. Sensitivity of the input parameters for predicting stress by the ANN model

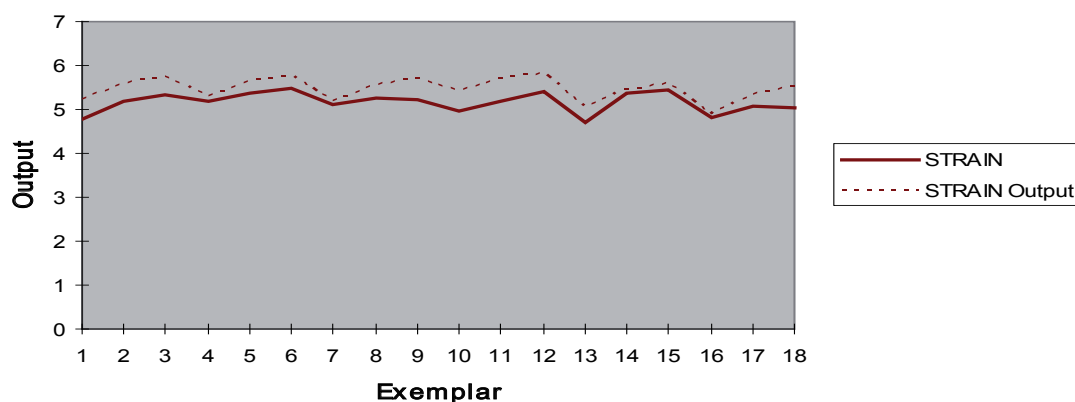
MSE versus Epoch



Rys. 11. Krzywa błędu podczas uczenia

Fig. 11. Error trend during the training stage

Desired Output and Actual Network Output



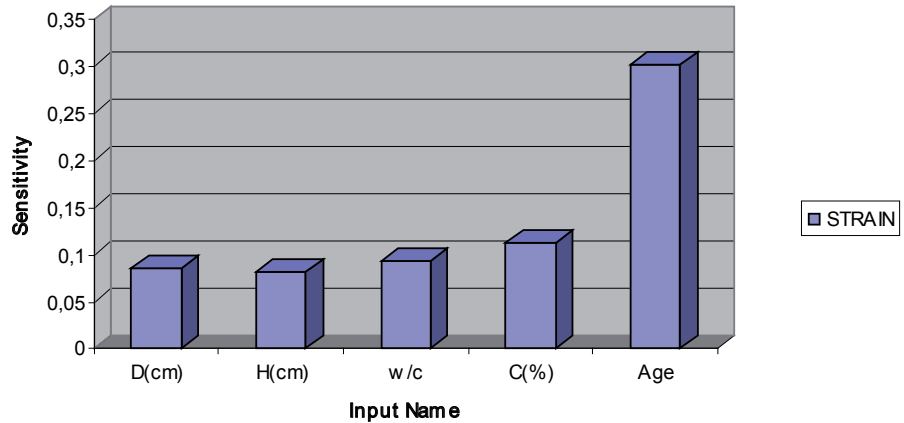
Rys. 12. Prognoza SSN mierzonych wartości okształcenia w trakcie pomiarów

Fig. 12. ANN prediction of measured strain values for the testing stage

podtorza ZC z dodatkiem cementu wynoszącym 20, 25 i 30% oraz stosunkiem w/c 0.5 i 0.4 spełniają dobrze kryterium równomiernego osiadania.

- 2) Wyniki obliczeń numerycznych wykazują, że zastosowanie warstwy podtorza ZC w nasypach KDP może spowodować wyraźne zmniejszenie pierwotnej 2 metrowej grubości podtorza BC, wykonanego z ubitego piasku (możliwe jest około 70% zmniejszenie grubości).
- 3) Otrzymane wyniki wykazują, że SSN można z powodzeniem stosować do prognozowania podstawowych wielkości służących do oceny sztywności (czyli naprężeń, odkształceń i modułu sprężystości w badaniach niszczących) warstw nasypu KDP, zawierających dodatek cementu (ZC). Chociaż SSN mają wiele zastosowań w różnych dziedzinach, włączając prognozowanie zależności naprężenie – odkształcenie, zastosowanie SSN do prognozowania właściwości rozwiązań projektowych i właściwości materiałowych warstw nasypu KDP wykonanych z dodatkiem cementu stanowi oryginalne podejście i jest bardzo przydatnym narzędziem projektowym dla praktykujących inżynierów, szczególnie w krajach, w których szerokość wynikająca z kolejowego prawa swobodnego przejazdu nie pozwala na zastosowanie pochyłości nasypu w proporcji 2H:1V, do warstw zbitego gruntu. Jeśli nie ma możliwo-

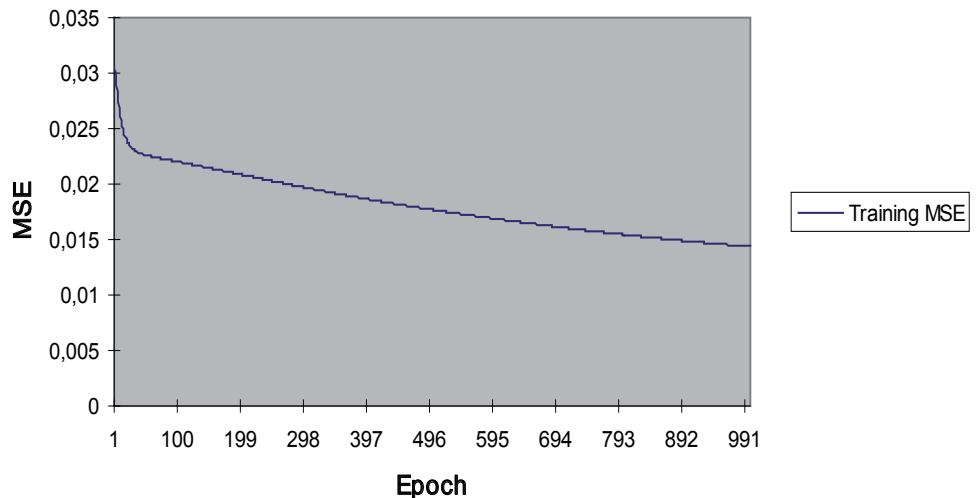
Sensitivity About the Mean



Rys. 13. Efektywność wpływu danych próbki betonowej na wartość odkształcenia prognozowanego przez SSN

Fig. 13. Sensitivity of the input parameters for predicting strain by the ANN model

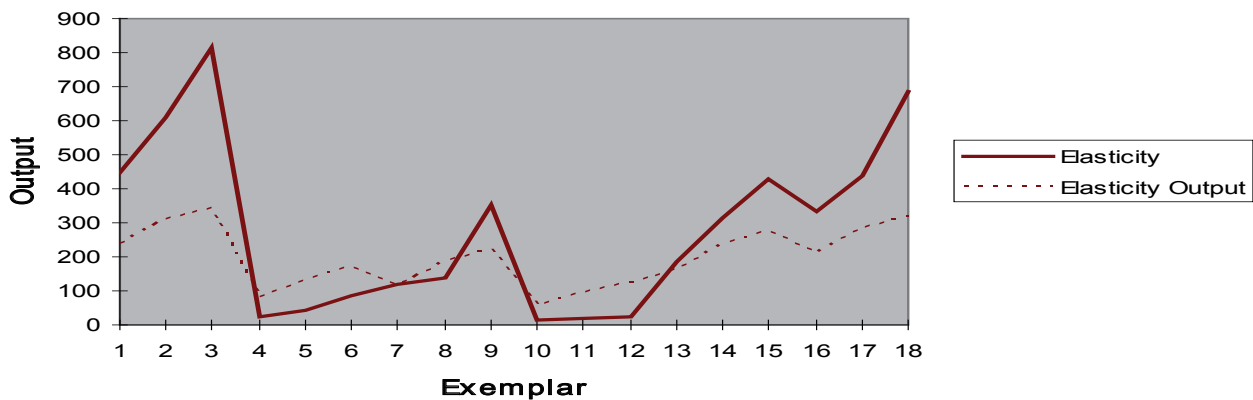
MSE versus Epoch



Rys. 14. Krzywa zmian błędu podczas uczenia

Fig. 14. Error trend during the training stage

Desired Output and Actual Network Output



Rys. 15. Prognozowane za pomocą SSN mierzone wartości modułu sprężystości w okresie badań

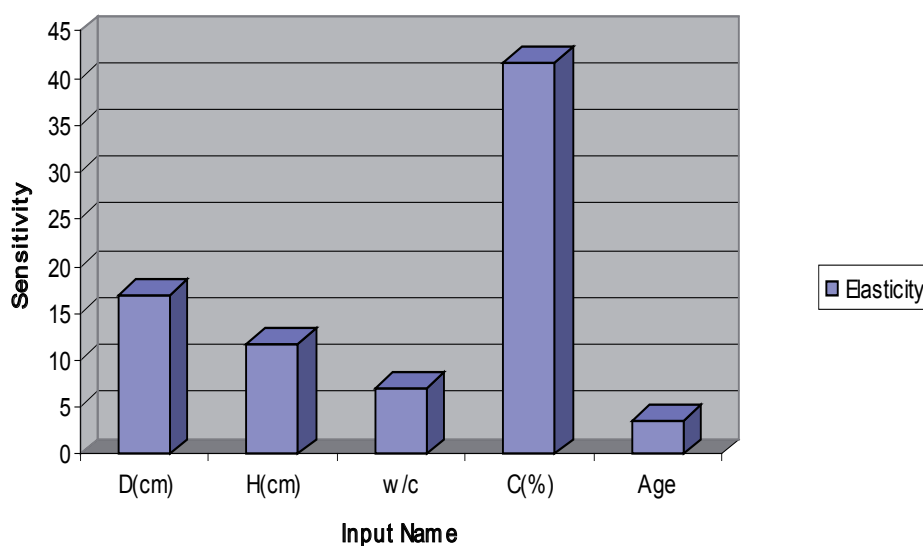
Fig. 15. ANN prediction of measured elasticity modulus values for the testing stage

ści wejścia w posiadanie większej powierzchni gruntu z powodu oszczędności czasu i pieniędzy projektanci mogą szybko stwierdzić czy bardziej stromą warstwę nasypu można zastosować w istniejącym korytarzu lądowym i podjąć decyzję eliminującą niektóre czasochłonne badania i kosztowne prace projektowe.

References / Literatura

1. I. Egeli, Engineering Consultancy Report: 'Design and Construction Aspects of High-Speed Train Railway Embankments-An Overview', Taiwan High Speed Railway Construction (THSRC) Project, Taiwan, ROC, 2003.
2. EN 1991-2: Eurocode 1: Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges, *European Standard: CEN-Cenelec*, Brussels, Belgium (www.cenelec.eu), 1991.
3. J. S. Mundrey, *Railway Track Engineering*, 3rd Ed., *Tata-McGraw-Hill Publishing Co. Ltd.*, N. Delhi, India, 2008.
4. E. T. Selig, J. M. Waters, *Track Geotechnology and Substructure Management*. *Thomas Telford Services Ltd.*, London, England, 1994.
5. TS 500: Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. *Türk Standardları*
6. *Enstitüsü-TSE* (in Turkish), Ankara, Turkey, 2000.
7. TS 706: Beton Agregaları, *Türk Standardları Enstitüsü-TSE* (in Turkish), Ankara, 2009.
8. TS 802: Beton Karışımı Tasarım Hesap Esasları, TSE (in Turkish), Ankara, Turkey, 2009.
9. TS EN 12390-2: Laboratuvarında Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi, TSE (in Turkish), Ankara, Turkey, 2002.
10. TS EN 12390-3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, TSE (in Turkish), Ankara, Turkey, 2003.
11. UIC Report: High Speed Principles and Advantages, *International Union of Railway*, Paris, France (www.uic.org), 2007.
12. UIC Code-719R: Earthworks and track-bed layers for railway lines, *International Union of Railway*, Paris, France (www.uic.org), 1994.
13. H. Usun, Laboratory Study for Determining Geotechnical Engineering Properties of Cement- Treated and –Untreated Backfill Soils used in High Speed Railway Embankments, M.Sc. Thesis.

Sensitivity About the Mean



Rys. 16. Efektywność wpływu danych próbki betonowej na wartość modułu sprężystości prognozowanego przez SSN

Fig. 16. Sensitivity of the input parameters for predicting elasticity moduli by the ANN model

6. Conclusions

Following conclusions were drawn from this study:

- 1) FEM analysis showed that only three C-PSL mixes with 20, 25, and 30% cement contents with 0.5, 0.4 water-to-cement, w/c ratios met the strict total settlement criteria.
- 2) Numerical results indicate that; use of C-PSL in the HSTR embankment can reduce the thicknesses of the original 2 m thick U-PSL material of compacted sand considerably (up to about 70% reduction is possible).
- 3) Obtained results showed that ANN can be confidently used to predict essential stiffness properties (ie. stress, strain and elasticity modulus values at failure) of the cemented HSTR embankments layers (C-PSL). Though there are many applications of ANN in many fields, including the strain-stress predictions, the application of ANN for the prediction of design/material properties of the cemented embankment layers of HSTR is a novel concept and is a very practical design tool for the practicing engineers, especially for places where the train alignment's right-of way (ROW) width does not allow the usual 2H:1V side slopes of the conventional compacted soil layers. If more land appropriation is not an option to choose and for time and cost-saving reasons, designers can quickly see whether the steeper-sloped cemented embankment layer can be accommodated within the existing land corridor (ROW) and decide accordingly by eliminating some time consuming tests and costly design practices.