

Analiza numeryczna zachowania się stalowego gazociągu usytuowanego na różnych wysokościach osuwiska

Iwona Kowalska-Kubsik 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu, Kraków

Streszczenie: Praca dotyczy analizy numerycznej zachowania stalowego gazociągu na osuwisku. Osuwiska są powszechnym zjawiskiem geologicznym, mogącym uszkodzić gazociągi. Wykorzystano zaawansowane metody obliczeniowe, m.in. model gruntowy Druckera–Pragera i dynamiczny oraz statyczny model obliczeniowy. Analiza numeryczna pozwoliła ocenić wpływ miejsca położenia gazociągu na naprężenia, odkształcenia i ryzyko uszkodzeń. Wyniki badań dostarczyły wartościowych informacji inżynierskich do projektowania, konstrukcji i utrzymania gazociągu. Optymalizacja projektu, materiałów i systemów podparcia zmniejszy ryzyko uszkodzeń. Wnioski z analizy mogą pomóc instytucjom regulacyjnym i operatorom gazociągów w zarządzaniu ryzykiem związanym z osuwiskami, poprawiając bezpieczeństwo i niezawodność infrastruktury gazowej.

Słowa kluczowe: symulacje numeryczne, osuwiska, gazociągi

NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF A STEEL GAS PIPELINE LOCATED AT VARIOUS HEIGHTS ON A LANDSLIDE

Abstract: The paper concerns on the numerical analysis of the behavior of a steel gas pipeline on a landslide. Landslides are a common geological phenomenon that can damage gas pipelines. Advanced computational methods were used, including the Drucker-Prager constitutive soil model, as well as dynamic and static computational models. The numerical analysis allowed for the assessment of the impact of the gas pipeline's location on stresses, deformations, and the risk of damage. The research findings provided valuable engineering information for the design, construction, and maintenance of the gas pipeline. Optimizing the design, materials, and support systems will reduce the risk of damage. The conclusions from the analysis can assist regulatory institutions and gas pipeline operators in managing the risks associated with landslides, thereby enhancing the safety and reliability of the gas infrastructure.

Keywords: numerical simulation, landslide, gas pipe

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-37-1_6

1. Wprowadzenie

Od początku XXI wieku, wraz z dynamicznym rozwojem gospodarki globalnej, zapotrzebowanie na energię na całym świecie wzrasta. Gaz ziemny, jako czyste i przyjazne dla środowiska wysokiej jakości źródło energii, jest doceniany i faworyzowany przez rządy różnych krajów. Inwestycje związane z budową gazociągów na gaz ziemny w wielu krajach rozwijają się bardzo szybko. Transport gazociagowy zapewnia zaspokojenie energetycznych potrzeb wielu mieszkańców.

Warunki geologiczne wzdłuż trasy przebiegu gazociągu na górskich obszarach są złożone. Trudno uniknąć przekraczania obszarów niekorzystnych pod względem geologicznym w trakcie budowy, a bardzo prawdopodobne jest wystąpienie niekorzystnych zjawisk geologicznych pod wpływem czynników powodujących niestabilność skarpy. Osuwisko jest jednym z powszechnych zjawisk geologicznych niekorzystnie wpływających na zachowanie się gazociągów i ropociągów na górskich obszarach. Pod wpływem siły wywołanej aktywności osuwiska gazociągi ułożone w zboczu są podatne na deformacje lub nawet uszkodzenia, co prowadzi do wycieku gazu i poważnie zagraża bezpieczeństwu gazociągów, wpływając na życie ludzi.

Rury wykorzystywane do budowy gazociągów w większości przypadków małych ruchów mas ziemnych są na tyle wytrzymałe, że nie ma potrzeby wprowadzania drogiego rozwiązania geoinżynierskich takich jak mury oporowe czy kotwienie gazociągu. Często wystarczy wskazać na skarpie najdogodniejsze położenie gazociągu, w którym wartości sił działających na gazociąg nie będą przekraczały jego wytrzymałości.

Gazociągi na obszarach podatnych na osuwiska wymagają regularnej konserwacji i monitorowania, aby zapewnić ich ciągłe bezpieczeństwo i funkcjonalność. Może to obejmować regularne kontrole, geotechniczne monitorowanie zboczy oraz systemy wczesnego ostrzeżenia w celu wykrycia jakichkolwiek oznak niestabilności lub potencjalnej aktywności osuwiskowej.

Budowa gazociągów na terenach osuwiskowych wiąże się z koniecznością przestrzegania określonych przepisów i norm. Organizacje regulacyjne mogą wymagać przeprowadzenia kompleksowych badań geotechnicznych, ocen ryzyka i przestrzegania wytycznych dotyczących bezpieczeństwa w celu ochrony ludzi, mienia i środowiska.

Rozwiązanie tych problemów wymaga podejścia wielodyscyplinarnego, obejmującego prace inżynierów geotechnicznych, projektantów gazociągów i ekspertów do spraw środowiska. Staranne planowanie inwestycji, dokładne badania terenowe i wdrożenie odpowiednich rozwiązań inżynierskich są kluczowe dla zmniejszenia ryzyka związanego z budową gazociągów na terenach osuwiskowych.

Gazociągi to ważne obiekty strategiczne. Unikanie ich uszkodzeń spowodowanych przez zjawiska naturalne lub działalność człowieka ma ogromne znaczenie praktyczne.

Jednak tego rodzaju gazociągi, jako należące do długich, liniowych obiektów inżynierskich, często narażone są na uszkodzenia spowodowane osuwiskami (Zhou i in. 2012, Xue i Yang 2013, Ho i in. 2014). Te uszkodzenia mogą prowadzić do dużych deformacji, pęknięć gazociągu, co z kolei może skutkować wyciekami gazu ziemnego i przerwami w transporcie gazociągowym, a nawet stanowić zagrożenie dla życia ludzi. Zapobieganie stratom spowodowanym niekorzystnymi zjawiskami na terenach osuwiskowych i kontrolowanie ich to problem, który wymaga dalszych badań. Liczba opracowań dotyczących osuwisk wpływających na gazociągi i ropociągi stale wzrasta (Lin i in. 2009, 2011, Wang i Deng 2010, Kinash i Najafi 2012, Magura i Brodniansky 2012, Zhao o Zhao 2014, Huang i in. 2015, Liu i in. 2015). Większość z nich skupia się na badaniu zachowania mechanicznego, analizie słabych miejsc tych obiektów oraz czynników wpływających na zachowanie się rurociągu podczas aktywności osuwiska. Prace te dostarczają głównie wyników teoretycznych, a brakuje praktycznych wskaźników dotyczących przewidywania uszkodzeń gazociągu spowodowanych aktywnością osuwiska i zapobiegania im. Praktyka inżynierska pokazuje, że przed wystąpieniem osuwiska powierzchnia gruntu ma tendencję do wykazywania pewnych charakterystycznych cech, takich jak pęknięcia, deformacje, ślizganie się itp., a doświadczeni inżynierowie mogą na ich podstawie określić przybliżony zakres aktywności osuwiska. Jednak wciąż konieczne jest monitorowanie, a nawet szacowanie możliwych uszkodzeń gazociągu spowodowanych przez osuwisko. Jeśli na przykład znany byłby zasięg osuwiska, czyli jego szerokość, możliwe byłoby bardziej dokładne oszacowanie, czy gazociąg zostanie zniszczony. Ponadto opracowany wskaźnik stałby się wiarygodną podstawą dla działań ratowniczych, a służby ratunkowe mogłyby podjąć odpowiednie środki w celu minimalizacji szkód.

Osuwisko to trudno kontrolowane i trudno przewidywalne zjawisko, jeśli chodzi o jego zasięg i charakter. Najczęstszymi czynnikami sprzyjającymi powstawaniu osuwisk są:

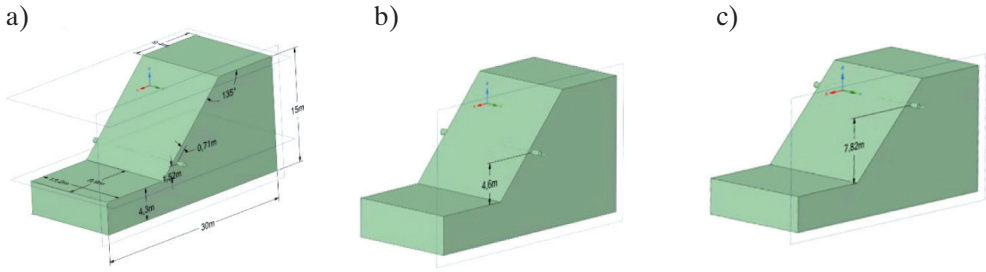
- Układ warstw gruntów równoległy do nachylenia zbocza. Taki układ warstw sprzyja poślizgowi i destabilizacji zbocza.
- Wypór wody i ciśnienie spływowe w zboczu. Nagromadzenie wody w zboczu może zwiększać ciśnienie i redukować opór na ścinanie, prowadząc do osuwiska.
- Napór wody od dołu na górne warstwy gruntu. Woda zalegająca na dnie zbocza może zmniejszać wytrzymałość na ścinanie górnego gruntu, przyczyniając się do osuwiska.
- Nasiąknięcie gruntu na skutek opadów atmosferycznych. Opady powodują nasycenie gruntu wodą, co prowadzi do pęcznienia i zmniejszenia wytrzymałości na ścinanie.
- Istnienie naturalnych potencjalnych powierzchni poślizgu. Obecność takich powierzchni, zwłaszcza w łańcach, ułatwia powstawanie osuwisk.

- Rozmycie lub podkopanie zbocza. Działania erozyjne, takie jak działanie wód powierzchniowych lub podmycie przez wody gruntowe, mogą prowadzić do destabilizacji zbocza.
- Sufozja. Woda, infiltrując w grunt, może wymywać drobne cząstki, co prowadzi do tworzenia kawern i ruchu masowego gruntu.
- Przebicie hydrauliczne. Wypływ wody gruntowej powyżej podstawy zbocza może powodować destabilizację i osuwisko.
- Cykliczność przemarzania i odmrażania gruntu. Zmiany temperatury mogą powodować spadek wytrzymałości na ścinanie w rejonach leja depresyjnego wody gruntowej.
- Niekontrolowane dociążenie naziomu lub stoku. Nadmierny obciążenie terenu może prowadzić do osłabienia stabilności zbocza.
- Nawodnienie naziomu przy braku drenaży opaskowych. Brak odpowiedniego odprowadzania wody gruntowej z naziomu może prowadzić do zmniejszenia stabilności zbocza.
- Zniszczenie struktury gruntu. Rozluźnienie struktury gruntu, na przykład wskutek działań związanych z budową lub eksploatacją, może wpływać na jego wytrzymałość i prowadzić do osuwiska.
- Drgania. Wibracje wywołane przez ruch drogowy, prace ziemne czy wybuchy mogą wpływać na destabilizację zbocza.
- Wypieranie gruntu. Nadmierna eksploatacja terenu lub obciążenie może prowadzić do wypierania gruntu i destabilizacji zbocza.
- Niewłaściwe zaprojektowanie nachylenia skarp. Błędne zaprojektowanie nachylenia skarp wykopu lub nasypu może prowadzić do osuwisk.

Do powstania osuwiska zazwyczaj przyczynia się kombinacja kilku czynników, które mogą być spowodowane działalnością człowieka. Na terenach zurbanizowanych wpływ człowieka jest często kluczowy, a niekorzystne działania obejmują podcinanie skarp, zmiany w kształcie terenu, obciążanie lub odciążanie stoków, działania dynamiczne na gruncie (np. wstrząsy), zmiany w sposobie użytkowania terenu (wylesianie, orka) oraz kierowanie wód na zbocza.

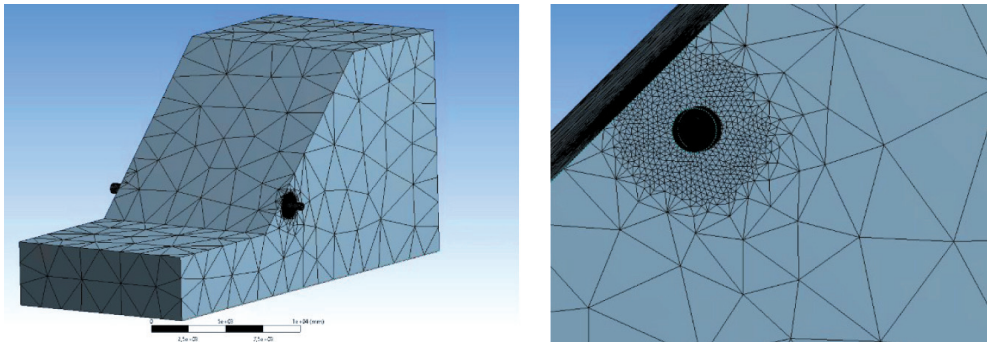
Ze względu na złożoność zagadnienia sytuowania gazociągu na skarpach przeprowadzanie badań eksperymentalnych jest trudne i bardzo kosztowne, dlatego szczególne możliwości stwarza wykorzystanie narzędzi numerycznych do analizy zachowania się gazociągu na osuwisku – w zależności od położenia rurociągu na szczycie skarpy, w środku lub u jej podnóża. Pozwala ono na stworzenie wielu możliwych scenariuszy aktywności osuwiska tylko na podstawie zasobów informatycznych.

Wnioski z przeprowadzonej analizy numerycznej mogą dostarczyć istotnych informacji inżynierskich dla projektantów, operatorów gazociągów oraz instytucji regulacyjnych.



Rys. 2. Usytuowanie analizowanych przypadków ułożenia gazociągu na skarpie: a) na dole; b) w części środkowej; c) na górze

Dyskretyzację modelu wykonano elementami tetrahedralnymi zastosowanymi do skarpy oraz elementami heksahedralnymi zastosowanymi do gazociągu (rys. 3). Wielkość elementów dopasowano tak, aby uzyskać poprawną i jednocześnie szybką analizę. Obszary kontaktu pomiędzy gruntem a gazociągiem zostały odpowiednio zagęszczone.



Rys. 3. Dyskretyzacja modelu skarpy wraz z gazociągiem

Do numerycznych analiz gruntu powszechnie stosowane są podstawowe dwa modele konstytutywne gruntu: model Coulomba–Mohra oraz model Druckera–Pragera (Chen 1996).

Warunek plastyczności dla modelu np. Druckera–Pragera może być przedstawiony następująco (Więckowski 2004):

$$f(\sigma_{ij}) = q - mp - k \quad (1)$$

gdzie parametr m wyrażono zależnością:

$$m = \frac{18 \sin \phi}{9 - \sin 2\phi} \quad (2)$$

a parametr k :

$$k = \frac{18c \cos \phi}{9 - \sin 2\phi} \quad (3)$$

gdzie:

ϕ – kąt tarcia wewnętrznego,
 c – spójność,

oraz p i q są niezmiennikami tensora naprężenia wyrażonymi zależnościami:

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{ii}, \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij}s_{ij})} \quad (4)$$

gdzie:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + \delta_{ij} \quad (5)$$

oznacza część dewiacyjną tensora naprężenia s_{ij} .

W większości prac związanych z teorią plastyczności w równaniu (1) współczynniki m i k są zdefiniowane inaczej niż w równaniach (2) i (3). Najczęściej stosuje się wzory (6) i (7), z których korzysta się w sytuacji, gdy stożek przedstawiający warunek Druckera–Pragera jest opisany na zewnętrznych krawędziach ostrosłupa reprezentującego warunek Coulomba–Mohra:

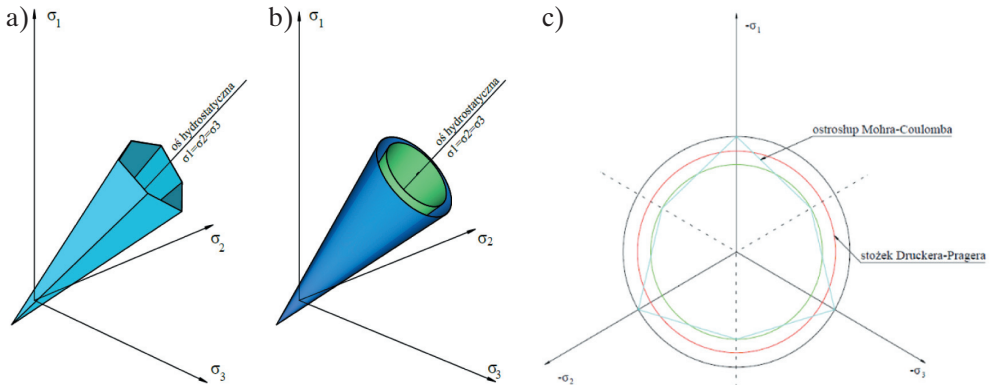
$$m = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (6)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{3 - \sin \phi} \quad (7)$$

Na rysunku 4 przedstawiona jest interpretacja geometryczna przekrojów powierzchni plastyczności w przestrzeni naprężeń głównych $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ dla ostrosłupa Druckera–Pragera i stożka Coulomba–Mohra.

W niniejszej analizie do zamodelowania gruntu zastosowano konstytutywny model Druckera–Pragera z parametrami przedstawionymi w tabeli 1.

Analizując rozkład siły działającej na gazociąg wywołanej przez aktywność osuwiska (Hao i in. 2012) oraz metody i wyniki badań interakcji rura – grunt (Calvetti i in. 2004, Liu i Yang 2004, Li i in. 2012, Alam i in. 2013, Dezfooli i in. 2015, Vazouras i in. 2015, Wang i in. 2015), w modelu przyjęto tylko siły grawitacyjne wywołujące ruch osuwiska oraz uwzględniono tarcie pomiędzy masami gruntu a gazociągiem. Interakcje gazociąg – grunt zamodelowano w postaci kontaktu z tarciem o współczynniku tarcia równym 0,6.



Rys. 4. Powierzchnie plastyczności w przestrzeni naprężeń głównych:

a) ostrosłup Coulomba–Mohra; b) stożki Druckera–Pragera: niebieski – opisany przez zewnętrzne krawędzie ostrosłupa, zielony – opisany przez wewnętrzne krawędzie ostrosłupa; c) przekroje powierzchni plastyczności

Tabela 1
Parametry gruntowe

Gęstość R [kg/m ³]	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [MPa]	Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie [MPa]	Wytrzymałość na dwuosiowe ściskanie [MPa]
1750	50	0,29	15	5E-5	20

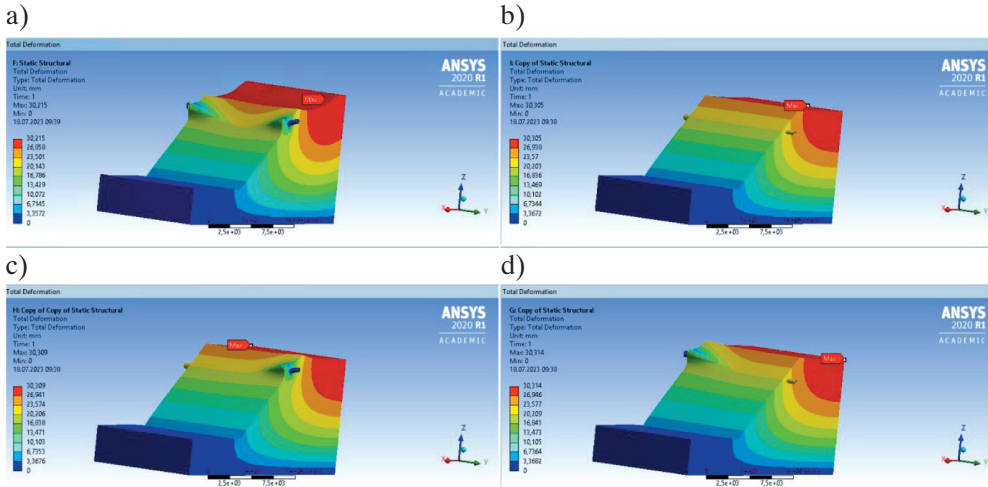
Analiza prac (Deng i in. 1998, Griffiths i Lane 1999) również wpłynęła na dobór modelu obliczeniowego w postaci modelu skarpy z umieszczonym odpowiednio gazociągiem. Przeanalizowano także warianty różnych warunków brzegowych skarpy oraz zamocowań końców gazociągu: pierwszy – to utwierdzenie wszystkich ścian modelu, drugi – to wariant pozwalający na swobodny ruch mas ziemnych w kierunku nachylenia skarpy przy utwierdzeniu końców gazociągu.

Poza tym w przypadku modelu z gazociągiem usytuowanym w górnej części osuwiska sprawdzono dodatkowo warianty asymetryczne polegające na utwierdzeniu tylko jednego końca gazociągu, a pozostawieniu drugiego swobodnego.

3. Wyniki analizy numerycznej

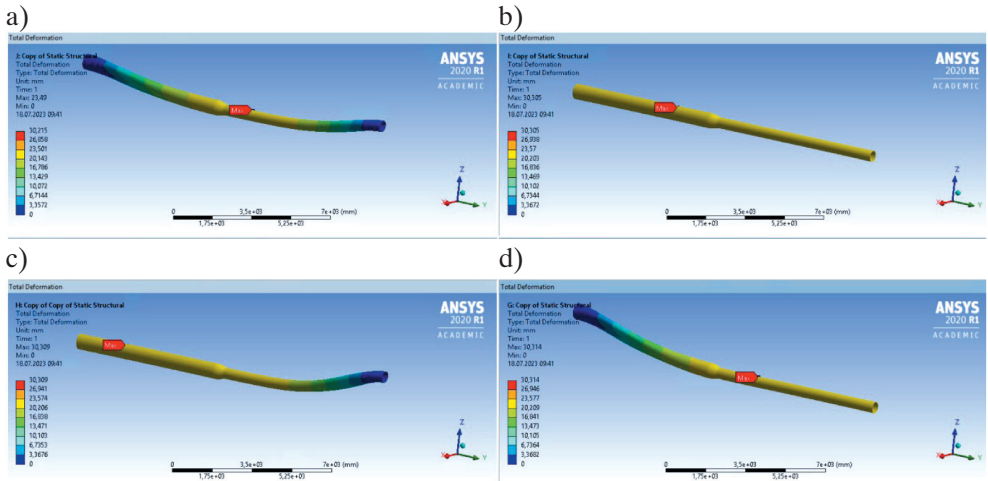
3.1. Model z gazociągiem umieszczonym w górnej części skarpy

Na potrzeby analizy otrzymanych wyników symulacji na rysunku 5 przedstawiono obrazy deformacji modelu skarpy dla różnych wariantów warunków brzegowych. Odkształcenia widoczne na rysunkach zostały – w celu ich lepszej wizualizacji – przerysowane.

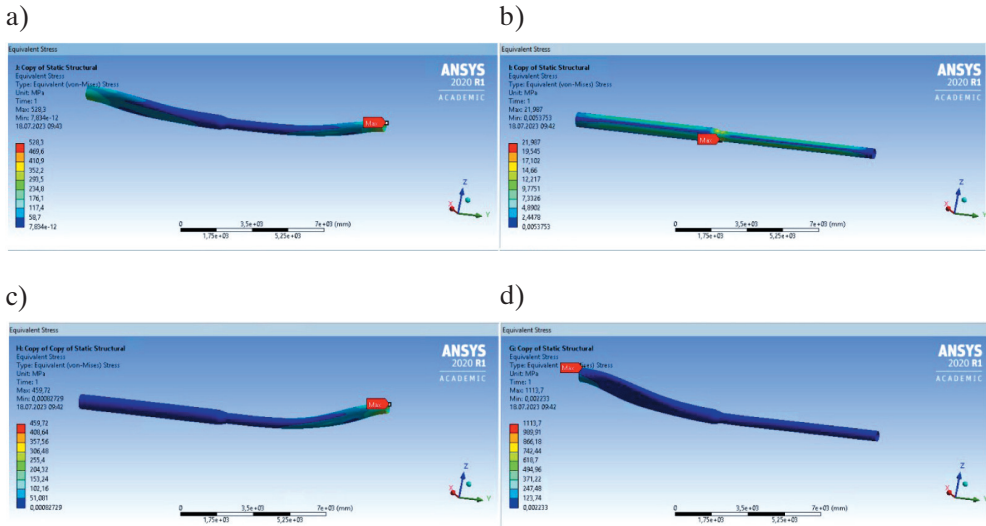


Rys. 5. Obraz deformacji modelu skarpy: a) skarpa swobodnie odkształcana z utwierdzonym gazociągiem; b) model skarpy swobodnej wraz ze swobodnie przemieszczającym się na skarpie gazociągiem; c) skarpa swobodna z gazociągiem utwierdzonym jednostronnie z prawej strony; d) skarpa swobodna z gazociągiem utwierdzonym jednostronnie z lewej strony

Na rysunku 6 przedstawiono odkształcenia samego gazociągu w tej samej kolejności modeli jak na rysunku 5. Maksymalne wartości odkształceń widocznych na rysunkach są zbliżone i wynoszą około 30 mm, co sugeruje, że sposób zamocowania czy utwierdzenia samego gazociągu na skarpie nie ma znaczenia dla wartości odkształceń. Inaczej wygląda obraz rozkładu naprężeń występujących w gazociągu (rys. 7).



Rys. 6. Odkształcenia gazociągu: a) skarpa swobodnie odkształca się z utwierdzonym gazociągiem; b) model skarpy swobodnej wraz ze swobodnie przemieszczającym się w skarpie gazociągiem; c) skarpa swobodna z gazociągiem utwierdzonym jednostronnie z prawej strony; d) skarpa swobodna z gazociągiem utwierdzonym jednostronnie z lewej strony



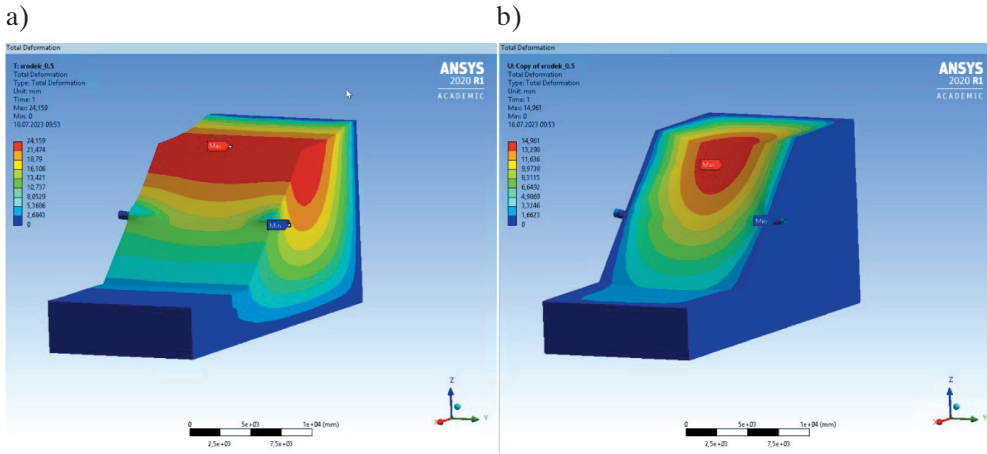
Rys. 7. Obraz naprężeń występujących w gazociągu: a) skarpa swobodnie odkształcana z utwierdzonym gazociągiem; b) model skarpy swobodnej wraz ze swobodnie przemieszczającym się na skarpie gazociągiem; c) skarpa swobodna z gazociągiem utwierdzonym jednostronnie z prawej strony; d) skarpa swobodna z gazociągiem utwierdzonym jednostronnie z lewej strony

Porównując wartości naprężeń gazociągu dla różnych warunków brzegowych, można zauważyć, że wartości naprężeń w obszarach utwierdzeń są podobne – w granicach 460–1100 MPa. Najmniejsze wartości naprężeń występują w przypadku zilustrowanym na rysunku 7b, gdzie gazociąg swobodnie przemieszcza się wraz z gruntem. W tym przypadku otrzymana maksymalna wartość naprężenia to 25 MPa, co jest zgodne z założeniami swobodnego ruchu gazociągu wraz z osuwiskiem.

W prezentowanych przykładach w zamodelowanym gazociągu o zmiennej średnicy można zauważyć wyężenia materiału gazociągu odpowiednio większe w strefach o mniejszej średnicy gazociągu.

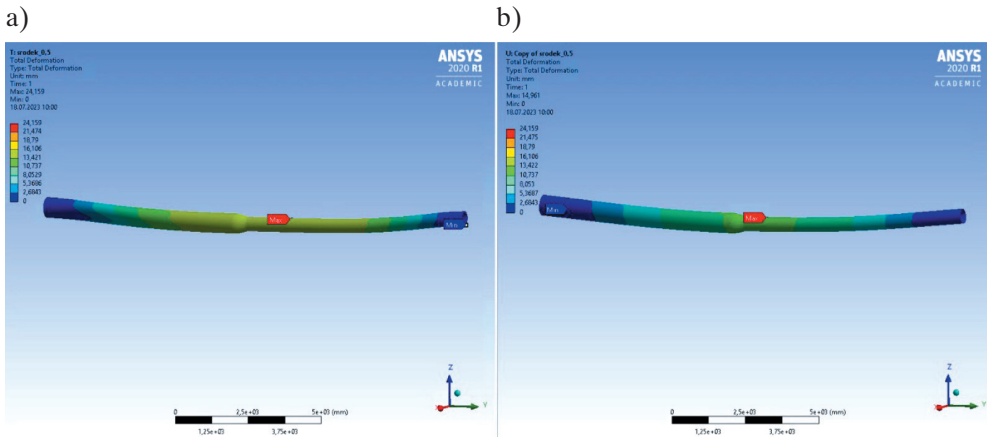
3.2. Model skarpy z gazociągiem umieszczonym na środku zbocza

Na rysunku 8 przedstawiono dwa modele skarpy z różnymi warunkami brzegowymi: model skarpy swobodnej (rys. 8a) i model skarpy z utwierdzonym gruntem na krawędziach (rys. 8b). Analizowano przypadek z utwierdzonymi końcówkami gazociągu. Widoczne maksymalne wartości deformacji w przypadku pierwszym są dwa razy większe niż w przypadku z całkowitym utwierdzeniem.



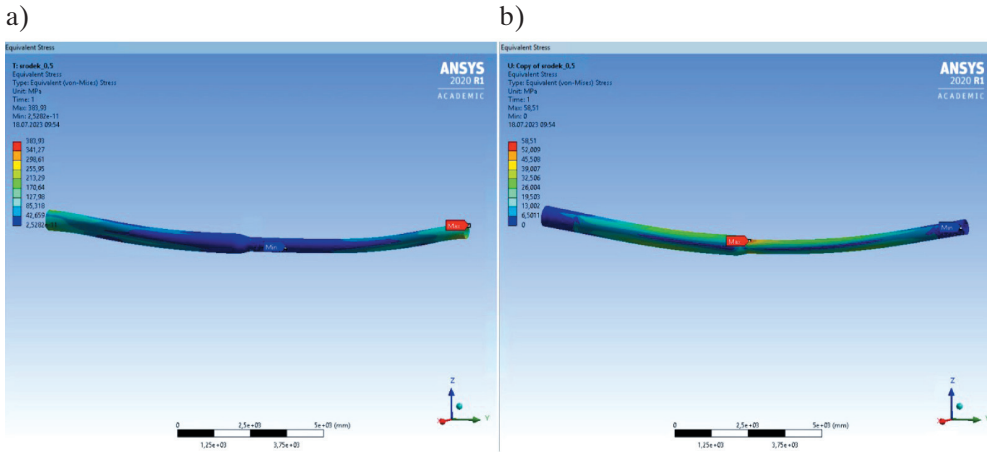
Rys. 8. Obraz deformacji modelu skarp:
 a) swobodny ruch osuwiska; b) krawędzie modelu utwierdzone

Na rysunku 9 przedstawiono obraz deformacji samego gazociągu. Obraz odkształceń jest bardzo podobny w obu modelach, a wartości tych odkształceń są zbliżone.



Rys. 9. Obraz deformacji gazociągu:
 a) swobodny ruch osuwiska; b) krawędzie modelu utwierdzone

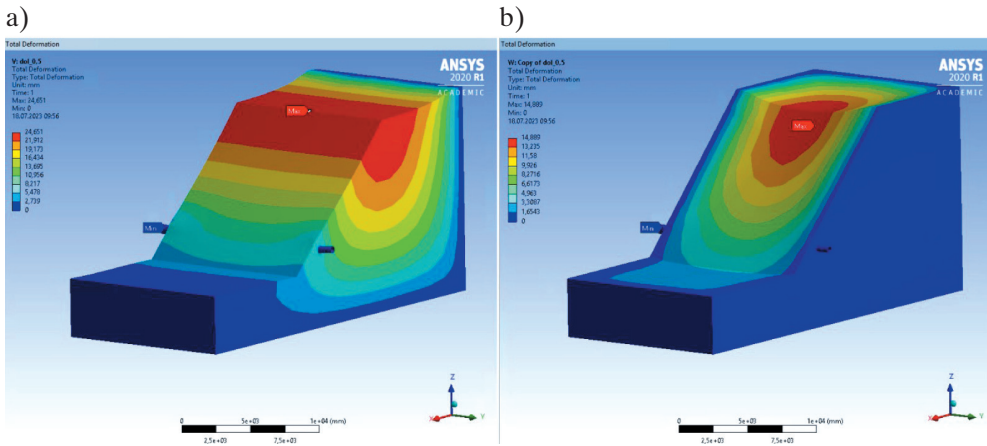
Na rysunku 10 przedstawiono obraz naprężeń w gazociągu, na którym widoczna jest zależność wartości naprężenia od zadanych warunków brzegowych. Największe wyciężenie, przy swobodnej skarpi, występuje w strefie utwierdzenia gazociągu, co jest związane z przesuwaniem się mas ziemnych i ścinaniem w strefie utwierdzenia. W przypadku utwierdzonego modelu największe wyciężenia występują w strefie środkowej, osiągając wartość zaledwie 50 MPa.



Rys. 10. Obraz naprężeń gazociągu:
 a) swobodny ruch osuwiska; b) krawędzie modelu utwierdzone

3.3. Model skarpy z gazociągiem umieszczonym w dolnej strefie zbocza

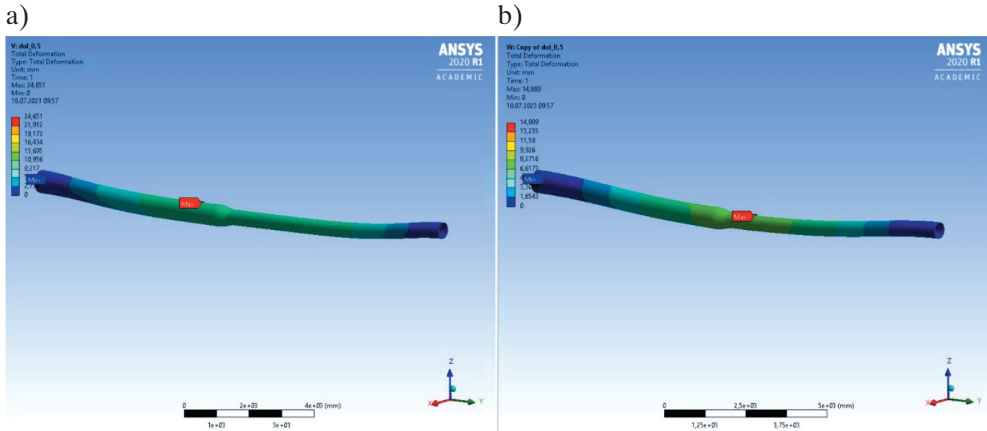
Deformacje analizowanego modelu z gazociągiem posadowionym u podnóża skarpy na głębokości 0,7 m zostały przedstawione na rysunku 11.



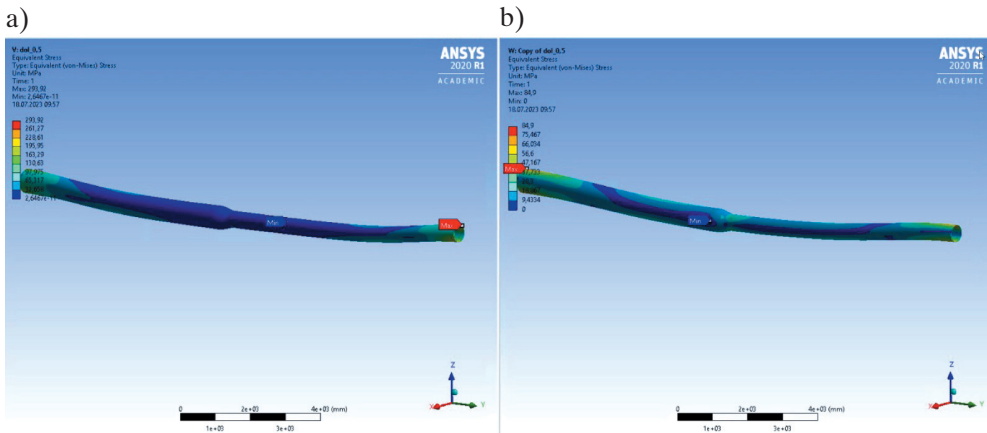
Rys. 11. Obraz deformacji modelu skarpy:
 a) swobodny ruch osuwiska; b) krawędzie modelu utwierdzone

Na rysunku 12 przedstawiono deformacje gazociągu usytuowanego u podnóża skarpy. Podobnie jak w poprzednich przypadkach odkształcenia gazociągu przy wariacie skarpy swobodnej są około dwukrotnie większe niż w przypadku skarpy utwierdzonej. Na rysunku 13 przedstawiono naprężenia w gazociągu. Widoczna jest na nim

różnica w zachowaniu gazociągu w stosunku do wyników z wcześniejszych symulacji. Największe naprężenia pojawiają się w strefie utwardzenia gazociągu (w jednym i drugim modelu) zdecydowanie mniejsze naprężenia pojawiają się w strefie środkowej.



Rys. 12. Obraz deformacji gazociągu:
a) swobodny ruch osuwiska; b) krawędzie modelu utwardzone



Rys. 13. Obraz naprężeń w gazociągu:
a) swobodny ruch osuwiska; b) krawędzie modelu utwardzone

4. Wnioski

Analizując otrzymane wyniki z przeprowadzonych symulacji zarówno deformacji, jak i naprężeń w gazociągu w kontekście przyjętych założeń badań, czyli określenia najdogodniejszego jego ułożenia na skarpie, można stwierdzić, że najbezpieczniejszym

miejszem posadowienia gazociągu jest podnóże skarpy. Największe naprężenia w gazociągu otrzymano w wyniku symulacji modelu z gazociągiem posadowionym w górnej części skarpy. Otrzymane wartości są od około 500 MPa do nawet 1000 MPa większe od naprężeń w gazociągu posadowionym u podnóża, gdzie maksymalne naprężenia wynoszą 300 MPa. Wartości te osiągnęte były w miejscach utwierdzenia gazociągu, a nie w strefie ruchu mas ziemnych.

Następnym planowanym badaniem jest zależność pomiędzy głębokością posadowienia gazociągu a kształtem płaszczyzn poślizgu osuwiska i głębokością ich występowania.

Literatura

- ANSYS, Inc., 2023, ANSYS 2023 [oprogramowanie], <http://www.ansys.com>.
- Alam S., Allouche E.N., Bartlett C., Sherpa A., Keil B., 2013, *Experimental evaluation of soil-pipe friction coefficients for coated steel pipes*, [w:] Arnaout S., Slavin L. (eds.), *Pipelines 2013: Pipelines and Trenchless Construction and Renewals – A Global Perspective: Fort Worth, Texas, USA, 23–26 June 2013*, American Society of Civil Engineers, s. 360–371. <https://doi.org/10.1061/9780784413012.034>.
- Calvetti F., di Prisco C., Nova R., 2004, *Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, s. 1292–1299. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1292\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1292)).
- Chen J.S., Pan C., Wu C.T., Liu W.K., 1996, *Reproducing Kernel Particle Methods for large deformation analysis of non-linear structures*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 139(1–4), pp. 195–227. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01083-3](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01083-3).
- Deng D.M., Zhou X.H., Shen Y.P., 1998, *Calculation of pipeline inner force and distortion during transverse landslide body*, *Oil & Gas Storage and Transportation*, vol. 17(7), s. 18–22.
- Dezfooli M., Abolmaali A., Razavi M., 2015, *Coupled nonlinear finite-element analysis of soil-steel pipe structure interaction*, *International Journal of Geomechanics*, vol. 15, 04014032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000387).
- Griffiths D.V., Lane P.A., 1999, *Slope stability analysis by finite elements*, *Géotechnique*, vol. 49, s. 387–403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>.
- Hao J.B., Liu J.P., Jing H.Y., Zhang H., Shen F., Tong H., Liu L., 2012, *A calculation of landslide thrust force to transverse pipeline*, *Acta Petrolei Sinica*, vol. 33(6), s. 1093–1097. <https://doi.org/10.7623/syxb201206025>.
- Ho D., Wilbourn N., Vega A., Tache J., 2014, *Safeguarding a buried pipeline in a landslide region*, [w:] Rahman S., McPherson D. (eds.), *Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability, Portland Oregon, 3–6 August 2014*, American Society of Civil Engineers, s. 1162–1174. <https://doi.org/10.1061/9780784413692.105>.

- Huang K., Lu H., Wu S., Jiang Y., 2015, *The stress analysis of buried gas pipeline crossing the landslide*, Chinese Journal of Applied Mechanics, vol. 32, s. 689–693.
- Kinash O., Najafi M., 2012, *Large-diameter pipe subjected to landslide loads*, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, vol. 3, s. 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000091](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000091).
- Li H., Xu Z., Yang Y.H. i in., 2012, *Strength failure analysis of buried piping loaded with landslide*, Process Equipment & Piping, vol. 49, s. 54–57.
- Lin D., Lei Y., Xu K., Huang R., Zhu Y., Luo M., Tao H., 2011, *An experiment on the effect of a transverse landslide on pipelines*, Acta Petrolei Sinica, vol. 32(4), s. 728–732.
- Lin D., Xu K.F., Huang R.Q., Zhu Y., Luo M., 2009, *Landslides classification of pipeline for transporting oil and gas*, Welded Pipe and Tube, vol. 32, s. 66–68.
- Liu Q.L., Yang M., 2004, *Analytical model and parameters determination of interaction between buried pipe and soil*, Rock and Soil Mechanics, vol. 25(5), s. 728–731.
- Liu W.Q., Zheng J., Wu H.G. i in., 2015, *Experimental study on effect of orthogonal landslide on pipe by model simulation*, Railway Engineering, no. 6, s. 117–120.
- Magura M., Brodniansky J., 2012, *Experimental research of buried pipelines*, Procedia Engineering, vol. 40, s. 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.054>.
- Vazouras P., Dakoulas P., Karamanos S.A., 2015, *Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 72, s. 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.014>.
- Wang L., Deng Q.L., 2010, *Mechanical analysis on the safety of gas-transporting pipeline caused by landslide for deformation*, Journal of Engineering Geology, vol. 18, s. 340–345.
- Wang L.M., Shu H.M., Huang X.G., 2015, *FEM analysis of pipeline subject to transverse landslide based on the strain criterion*, Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), vol. 33, s. 556–560.
- Więckowski Z., 2004, *The material point method in large strain engineering problems*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 193(39–41), s. 4417–4438. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.01.035>.
- Xue H., Yang X.Q., 2013, *Design and construction of Sino-Burma oil-gas pipeline in typical geological hazard areas*, Oil & Gas Storage and Transportation, vol. 32, s. 1320–1324.
- Zhao X.Y., Zhao Y., 2014, *Strain response analysis of oil and gas pipelines subject to lateral landslide*, Journal of Natural Disasters, vol. 23, s. 250–256.
- Zhou X.Y., Guo Y.H., Lv X.H., Yang Y., 2012, *Study on effects of different factors on pipelines risk under landslide*, Industrial Safety and Environmental Protection, vol. 38, s. 42–44.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z., 2005, *The Finite Element Method Set: Its Basis and Fundamentals*, 6th ed., Elsevier Science.