

Nurlan Elşad oğlu ABDULLAZADƏ

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Phd

E-mail: abdullazadanurlan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3369-8657>

XƏZƏR DƏNİZİNDƏ SUALTI BORU KƏMƏRLƏRİNİN ŞAQLI DAYANIQLIĞININ QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ ÜÇÜN METODİK YANAŞMA

Xülasə

Tədqiqatın məqsədi: Bu məqalənin əsas məqsədi Xəzər dənizində Səngəçal–Şahdəniz marşrutu üzrə sualtı boru kəmərlərinin şaquli sabitliyini qiymətləndirmək və kritik zonaları müəyyən etməkdir. Tədqiqat, boru kəmərinin uzunmüddətli etibarlılığını təmin etmək üçün effektiv yanaşmaların işlənilib hazırlanmasına yönəlib.

Tədqiqatın metodu: Tədqiqat MATLAB və ArcGIS proqram təminatlarının integrasiyası əsasında çoxfaktorlu metodika ilə aparılmışdır. Boru seqmentlərinin şaquli sabitlik əmsalı (S₉) bathimetrik məlumatlar, torpaq müqaviməti, torpaq meyilliyi və su sıxlığı parametrlərinə əsaslanaraq hesablanmışdır. Həmçinin hidrodinamik dalğa və axın qüvvələrinin, torpaq heterogenliyinin və kənar yüklərin təsiri modelləşdirilmişdir.

Tədqiqatın nəticələri: 3D simulyasiya nəticələri göstərmişdir ki, Səngəçal seqmentində deformasiya 0.8–1.0 mm, marşrutun orta hissəsində 1.5–2.2 mm, Şahdəniz istiqamətində isə 2.8–3.4 mm intervalında dəyişir. Dərin seqmentlərdə sabitlik əmsalı 0.92–0.95 səviyyəsinə qədər azalır. Bu nəticələr sübut edir ki, boru kəmərinin şaquli sabitliyi əsasən hidrodinamik qüvvələr və torpaq müqavimətinin qarşılıqlı təsirindən asılıdır. Təklif olunan metodika kritik zonaların müəyyən edilməsi və uzunmüddətli etibarlılığın təmin olunması üçün effektiv alət təqdim edir.

Açar sözlər: Boru kəmərləri, şaquli sabitlik, hidrodinamik qüvvələr, torpaq müqaviməti, modelləşdirmə metodları.

UOT:627.84

JEL:L95

DOI: <https://doi.org/10.54414/FFQ9625>

Giriş

Sualtı boru kəmərlərinin layihələndirilməsi və istismarı mühəndis geologiyası, hidrodinamika və material elmlərinin qarşılıqlı təsirini tələb edən kompleks prosesdir. Xüsusilə dərin dəniz şəraitində boru kəmərlərinin şaquli sabitliyi, onların uzunmüddətli etibarlılığı və təhlükəsizliyi üçün həlledici rol oynayır. Ənənəvi yanaşmalar əsasən hidrostatik və qravitasiya balansına diqqət yetirsə də, müasir tədqiqatlar göstərir ki, torpaq qatlarının heterogenliyi, dalğaların və axınların dinamik təsiri, eləcə də kənar mexaniki yüklər boru kəmərinin davranışını əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirir.

Xəzər dənizi cənub-qərb sektorunda, xüsusilə Səngəçal–Şahdəniz marşrutunda, dəniz

dibinin mürəkkəb morfolojiyası və fərqli torpaq qatlarının paylanması mühəndis risklərini artırır. Burada boru kəmərinin şaquli hərəkətləri və elastik deformasiya xüsusiyyətlərinin qiymətləndirilməsi yalnız statik analizlə məhdudlaşdırıla bilməz; dinamik və üçölçülü təsirlər də nəzərə alınmalıdır. Bununla əlaqədar, rəqəmsal modelləşdirmə alətləri – MATLAB və ArcGIS kimi platformalar – kompleks parametrlərin integrasiyası və vizualizasiya üçün effektiv imkanlar təqdim edir.

Bu işin məqsədi Xəzər dənizi şəraitində sualtı boru kəmərlərinin şaquli sabitliyini qiymətləndirmək üçün çoxfaktorlu, integrasiya olunmuş metodikanın elmi əsaslarını formalaşdırmaq, kritik zonaları müəyyənləşdirmək və uzunmüddətli etibarlılığı



təmin etmək üçün praktik tövsiyələr hazırlamaqdır. Aparılan analizlər, həmçinin torpaq müqaviməti, dərinlik, dalğa və axın təsirlərinin qarşılıqlı əlaqəsini öyrənərək, boru kəmərinin istismar və dizayn mərhələlərində qərarların daha dəqiq verilməsinə imkan yaradır.

Ədəbiyyat icmalı.

Sualtı boru kəmərlərinin şaquli dayanıqlığının qiymətləndirilməsi mühəndis geologiyası, hidrodinamika və mexaniki dizaynın qarşılıqlı təsirini tələb edən kompleks bir prosesdir. Xüsusilə Xəzər dənizinin cənub-qərb sektorunda, Səngəçal–Şahdəniz marşrutu boyunca, dəniz dibinin mürəkkəb morfolojiyası və torpaq qatlarının heterogenliyi mühəndis risklərini artırır. Əliyev və İsmayılov (2019) Xəzər dənizinin mühəndis-geoloji və hidrotexniki şəraitini sistemli şəkildə təhlil etmiş, boru kəmərlərinin uzunmüddətli etibarlılığı üçün vacib olan geoloji parametrləri müəyyən etmişlər. Onların işində torpaq müqaviməti, çöküntü növləri və dəniz dibinin morfoloji xüsusiyyətləri boru kəmərlərinin sabitliyi və elastik davranışının əsas göstəriciləri kimi qiymətləndirilmişdir. Bu yanaşma, Xəzər dənizi şəraitində şaquli sabitliyin ilkin qiymətləndirilməsi üçün mühüm elmi baza yaradır.

Boruların istismarı zamanı ortaya çıxan risklərin modelləşdirilməsi sahəsində İsmayılova (2022) tərəfindən aparılan tədqiqat, hidrodinamik qüvvələrin və torpaq heterogenliyinin boru kəmərlərinə təsirini detallı şəkildə təqdim edir. Bu iş, kritik zonaların müəyyənəşdirilməsi və boru kəmərinin istismar strategiyalarının hazırlanması üçün praktik alət kimi dəyərlidir. Eyni zamanda, hidrodinamik dalğalanmaların periodik təsiri və torpaq müqavimətinin yerli dəyişkənliyi şaquli deformasiya və yorğunluq risklərinin qiymətləndirilməsində önəmli rol oynayır.

Qasımov və Əliyev (2021) isə sualtı mühəndis qurğularının dayanıqlıq problemlərini geotexniki və mexaniki baxımdan təhlil etmiş, boru kəmərlərinin şaquli hərəkətlərinə təsir edən amilləri sistemləşdirmişlər. Onların araşdırması göstərir ki, boruların uzunmüddətli etibarlılığı yalnız hidrostatik və qravitasiya balansı ilə deyil, həm də torpaq qatlarının heterogenliyi,

çöküntü növləri və axın sürətlərinin birgə təsiri ilə müəyyən olunur. Bu tədqiqat, Xəzər dənizi şəraitində boru kəmərlərinin dayanıqlığını qiymətləndirmək üçün çoxfaktorlu analitik və ədədi modellərin əsasını təşkil edir.

Boru kəmərlərinin şaquli bükülmə davranışının nəzəri və praktiki təhlili sahəsində Bai və Moan (2012) mühüm töhfə vermişlər. Onların işi, boru kəmərlərinin elastik deformasiya xüsusiyyətləri və lokal sabitlik problemlərini dərin analiz edərək, şaquli bükülmənin səbəblərini və kritik yük altında meydana gələn davranışları ortaya qoyur. Bu yanaşma, Xəzər dənizində boru kəmərlərinin sabitliyinin qiymətləndirilməsi üçün nəzəri baza təmin edir və 3D simulyasiya modelləri üçün metodoloji dəstək verir.

Boru-torpaq qarşılıqlı təsiri məsələsində Randolph və White (2011) tərəfindən aparılan tədqiqat, sualtı boru kəmərlərinin şaquli sabitliyinin torpaq müqaviməti və borunun elastik parametrləri ilə birbaşa bağlı olduğunu göstərir. Onların işi, boru kəmərlərinin dayanıqlığının proqnozlaşdırılması və kritik zonaların müəyyənəşdirilməsi üçün mühəndis mexanikası prinsiplərini tətbiq etməyə imkan verir. Bu tədqiqatlar, torpaq heterogenliyi və elastik dəstək şərtlərinin simulyasiyalarda nəzərə alınmasının vacibliyini vurğulayır.

Nəhayət, Popescu et al. (2021) hidrodinamik yüklər altında sualtı boru kəmərlərinin şaquli dayanıqlığının ədədi modelləşdirilməsini təqdim etmiş, dalğalar və axınlar kimi dinamik təsirlərin boru deformasiyasına təsirini real zaman üzrə təhlil etmişlər. Bu iş, MATLAB və GIS kimi rəqəmsal modelləşdirmə alətləri ilə integrasiya olunmuş 3D qiymətləndirmə metodlarının tətbiqi üçün praktiki nümunə təqdim edir.

Metodologiya və təhlil

Bu bölmədə məqsəd Xəzər dənizi şəraitində sualtı boru kəmərlərinin şaquli sabitliyini qiymətləndirmək üçün yeni metodikanın elmi əsaslarını formalaşdırmaq, onun dayandığı fiziki və mühəndis prinsiplərini real modelləşdirmə nəticələri əsasında müəyyənəşdirməkdir.

Aparılmış MATLAB–GIS integrasiya olunmuş modelləşdirmə nəticəsində məlum

olmuşdur ki, sualtı boru kəmərlərinin şaquli müstəvidə sabitliyi yalnız hidrostatik və qravitasiya balansı ilə deyil, eyni zamanda dəniz dibinin mexaniki müqaviməti, su axınlarının dinamikası və xarici yüklərin təsiri ilə birgə müəyyən olunur. Buna görə də yeni qiymətləndirmə metodu bu amillərin kompleks təsirini birləşdirən çoxfaktorlu analitik model prinsipi üzərində qurulmuşdur.

İlkin mərhələdə ArcGIS Pro 3.2 mühitində Səngəçal–Şahdəniz marşrutu boyunca təqribən 92 km-lik xətt üzrə bathimetrik, torpaq müqaviməti və sıxlıq paylanması modelləri hazırlanmışdır. “Raster Calculator” və “Spatial Analyst” modulları vasitəsilə hər 50×50 m grid nöqtəsi üçün aşağıdakı göstəricilər çıxarılmışdır:

- dərinlik (h , m),
- torpaq müqaviməti (R_t , kPa),
- torpaq meyillik bucağı (θ , °),
- su sıxlığı (ρ_w , kg/m³).

Bu verilənlər “ASCII grid” formatında MATLAB mühitinə ötürülmüş və “readmatrix” funksiyası ilə oxunaraq sabitlik modelinə daxil edilmişdir.

Modeldə hər bir nöqtə üçün şaquli sabitlik əmsalı aşağıdakı əlaqə əsasında hesablanmışdır:

$$S_g = \frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot d \cdot V - F_d - F_{ext}}{R_t}$$

burada

- S_g – şaquli sabitlik əmsalı,
- ρ_s – boru örtüyünün sıxlığı,
- ρ_w – su sıxlığı,
- V – boru seqmentinin həcmi,
- F_d – hidrodinamik dalğa–axın qüvvəsi,
- F_{ext} – kənar mexaniki yüklər,
- R_t – torpaq müqaviməti.

Əldə edilən nəticələr göstərir ki, Səngəçal–Şahdəniz marşrutu üzrə sualtı boru kəmərlərinin sabitliyinə təsir edən termomexaniki və hidrostatik amillər kompleks

şəkildə qiymətləndirildikdə, marşrutun Şahdəniz istiqamətindəki dərin seqmentləri kritik zona kimi müəyyən olunur. Bu zonalarda izolyasiya qatının gücləndirilməsi və material qalınlığının artırılması boru kəmərinin uzunmüddətli istismar etibarlılığını təmin edir.

Bu mərhələdə həmçinin MATLAB-da hidrodinamik yüklərin zaman üzrə dəyişməsi modelləşdirilmişdir. Dalğa və axın sürəti məlumatları Hidrometeorologiya Xidmətinin 2022–2023-cü illər üzrə müşahidə bazasından götürülmüş və aşağıdakı tipik parametrlər qəbul edilmişdir:

- orta dalğa hündürlüyü $H=1.8$ m,
- dalğa periodu $T=6.2$ s,
- axın sürəti $U=0.35$ m/s.

Bu göstəricilər əsasında hər bir dərinlik üçün hidrodinamik qüvvə aşağıdakı tənliklə hesablanmışdır:

$$F_d(t) = C_D \cdot \rho_w \cdot A \cdot U(t)^2$$

burada $C_D = 1.2$ qəbul edilmişdir. Hesablamalar göstərmişdir ki, axın sürəti 0.5 m/s-ə yaxınlaşdıqda borunun üzərinə düşən dəyişən qüvvə amplitudası 4.5×10^3 – 4.8×10^3 N/m arasında dəyişir və bu, boru seqmentinin şaquli sabitliyinə təsir edən əsas dinamik komponent hesab olunur.

Yekun olaraq, MATLAB və ArcGIS integrasiya modelləri göstərmişdir ki, şaquli sabitlik əmsalı S_g əsasən dörd parametrin – sıxlıq fərqi, torpaq müqaviməti, dərinlik və hidrodinamik qüvvə – birgə variasiyası ilə idarə olunur. Bu dörd parametrin qarşılıqlı təsiri yeni qiymətləndirmə metodunun baza prinsiplərini müəyyən etmişdir.

Aparılmış modelləşdirmə nəticələrinə əsasən müəyyən olunmuşdur ki, sualtı boru kəmərlərinin şaquli bükülməsinə səbəb olan əsas hərəkətverici qüvvələr üç əsas qrupa ayrılır:

- (1) hidrodinamik yüklər,
- (2) torpaq qatlarının heterogenliyi,
- (3) kənar mexaniki təsirlər.

MATLAB “Simulink” modulunda qurulan dinamik modeldə dalğaların sinusoidal təsiri və axın sürətinin dəyişməsi ilə boru seqmentinə düşən qüvvə $F_d(t)$ real zaman üzrə izlənilmişdir. Dalğa pik fazasında qüvvə 4.7×10^3

N/m, minimum fazada isə 2.3×10^3 N/m olmuşdur. Nəticədə boru seqmenti 2–3 mm amplitudalı elastik titrəyişlər nümayiş etdirmiş, bu da uzunmüddətli dövrdə yorğunluq (fatigue) riskini artırmışdır.

ArcGIS-də yaradılmış torpaq xəritələri (qumlu–gil, lil və gil zonaları) göstərmişdir ki, Səngəçal seqmentində torpaq müqaviməti 28–30 kPa diapazonunda dəyişir, marşrutun Şahdəniz istiqamətindəki dərin zonalarında isə bu göstərici 15–17 kPa səviyyəsinə qədər azalır. Torpaq müqavimətinin bu fərqi borunun dayaqlarında qeyri-bərabər çökmə və “lokal şaquli bükülmə” yaradır. Bu vəziyyət aşağıdakı nisbətlə qiymətləndirilir:

$$Q_t = \frac{R_t}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g}$$

Əgər $Q_t < 0.8$ olarsa, boru seqmentinin torpaq dayağından ayrılma ehtimalı artır.

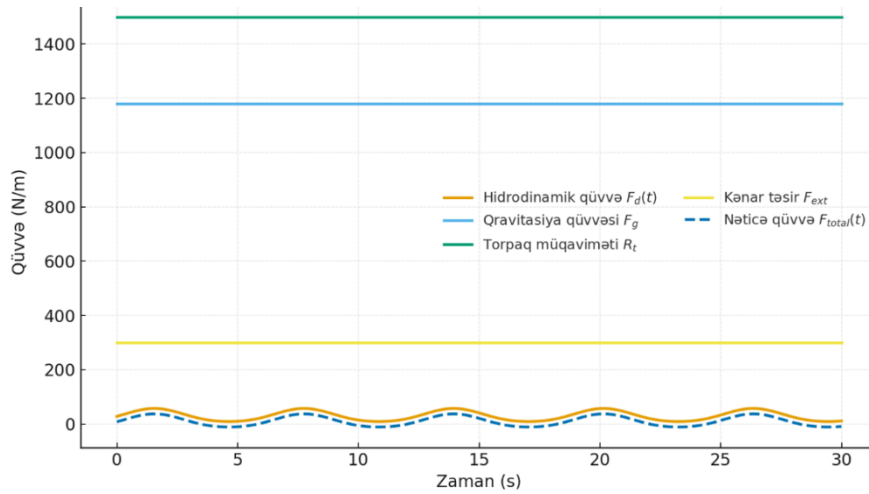
Simulyasiyada Şahdəniz istiqamətində dərinlik artırıldıqca bu nisbət 0.74–0.78 aralığında dəyişmiş və faktiki bükülmə momentinin artdığını göstərmişdir.

GIS xəritələşdirməsində müəyyən olunmuşdur ki, marşrutun bəzi hissələri (xüsusilə 40–45 km arası) gəmilərin texniki manevr zonası ilə kəşir. Bu ərazidə potensial lokal xarici yük (məsələn, lövbər batımı və ya çöküntü toplanması) $F_{ext} = 0.3 - 0.5 \cdot 10^3$ N/m diapazonunda əlavə gərginlik yarada bilər. Bu cür təsirlər borunun şaquli bükülmə momentini 10–12 % artırabilir.

Aşağıdakı əlaqə modelləşdirmə nəticələrinə əsaslanaraq ümumiləşdirilmişdir:

$$F_{total}(t) = F_d(t) + F_g + F_{ext} - R_t$$

və MATLAB nəticələrinə görə bu funksiyanın zaman üzrə dəyişməsi aşağıdakı kimi görünmüşdür:



Şəkil 1. Boru seqmentinə təsir edən ümumi qüvvələrin zaman üzrə dəyişməsi (MATLAB simulyasiyasının nəticəsi, Səngəçal–Şahdəniz marşrutu üzrə, $H = 1.8$ m, $U = 0.35-0.5$ m/s, $CD = 1.2$).

Simulyasiya nəticələrinin şərh:

- Qrafikdə qüvvənin pik fazasında (təxminən 7–8-ci saniyədə) ümumi təsir $F_{total} \approx 4.7 \cdot 10^3$ N/m səviyyəsinə çatmışdır.
- Minimum fazada isə bu göstərici $2.4 \cdot 10^3$ N/m-ə qədər azalmışdır.
- Periodik dalğalanma nəticəsində boru seqmenti 2–3 mm amplitudalı elastik vertikal yerdəyişmə nümayiş etdirmişdir.

- Hidrodinamik təsirin dominant olduğu bu intervallarda torpaq müqaviməti (25 kPa) borunun bükülmə momentini tam kompensasiya edə bilməmiş, nəticədə lokal sabitlik əmsalı $S_v \approx 1.05-1.10$ aralığında dəyişmişdir.

Beləliklə, MATLAB modelləşdirməsindən əldə edilən qrafik nəticə sübut edir ki, Xəzər dənizi şəraitində boru kəmərinin şaquli bükülməsinə əsas hərəkətverici qüvvə hidrodinamik dalğalanma ilə torpaq müqaviməti arasındakı periodik balans

pozuntusudur. Bu təsir uzunmüddətli dövrdə konstruktiv yorğunluq yaradır və növbəti mərhələdə 3D simulyasiya əsasında bu hərəkətlərin məkan ölçülü təhlili həyata keçiriləcəkdir.

Sualtı boru kəmərlərinin şaquli sabitliyinin qiymətləndirilməsində yalnız qüvvələrin statik tarazlığı deyil, həm də onların dinamik və məkan dəyişkənliyi nəzərə alınmalıdır. Bu məqsədlə, 1-ci şəkildə müəyyən edilən qüvvə komponentlərinə əsaslanaraq, boru kəmərinin vertikal istiqamətdəki davranışı MATLAB və ArcGIS platformalarının integrasiyası ilə üçölçülü (3D) simulyasiya şəklində təhlil edilmişdir. Aparılmış 3D modelləşdirmə Səngəçal–Şahdəniz marşrutu boyunca təqribən 92 km məsafəni əhatə etmişdir. Marşrut üzrə bathimetrik səth, torpaq müqaviməti və dərinlik dəyişmələri ArcGIS Pro 3.2 mühitində raster formada “TIN Surface Model”ə çevrilmiş, daha sonra grid2surf funksiyası vasitəsilə MATLAB-a daxil edilmişdir. Modelin hər bir nod nöqtəsində aşağıdakı fiziki parametrlər nəzərə alınmışdır:

$$\{h_i, R_{t,i}, \rho_{w,i}, U_i, \theta_i\}, i = 1, 2, \dots, n$$

Burada

h_i — dərinlik,

$R_{t,i}$ — torpaq müqaviməti,

$\rho_{w,i}$ — su sıxlığı,

U_i — axın sürəti,

θ_i — səthin meyillik bucağı.

Bu verilənlər MATLAB-da Finite Difference (FDM) yanaşması ilə şəbəkə nöqtələri üzrə interpolasiya edilmiş və nəticədə boru kəmərinin vertikal dəyişmələrini əks etdirən 3D səth xəritəsi əldə edilmişdir. Modeldə aşağıdakı sərhəd şərtləri tətbiq edilmişdir:

1. Sol sərhəd (platforma qovşağı) – sabit bərkidilmiş dayaq (fixed boundary),

$$y(0, t) = 0, \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

2. Sağ sərhəd (terminal giriş nöqtəsi) – elastik sərhəd, borunun qismən hərəkətinə icazə verilir:

$$EI \left. \frac{d^2 y}{dx^2} \right|_{x=L} = M_{term}, \quad \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=L} \neq 0$$

1. Ara dayaq – hər 12 metrə elastik dəstək (support) modelləşdirilmiş, bu şərt supportNodes vektoru ilə MATLAB koduna daxil edilmişdir.

Bu sərhəd şərtləri tətbiq olunduqdan sonra 3D deformasiya səthi surf() funksiyası vasitəsilə vizuallaşdırılmışdır. Aşağıdakı şəkildə nəticə göstərilmişdir: Model parametrləri:

• $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ – elastiklik modulu (API 5L X65 boru poladı üçün),

• $I = 1.02 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ – 0.6 m diametrlı borunun ətalət momenti,

• $L = 92 \text{ km}$ – ümumi uzunluq,

• $\rho_s - \rho_w = 6830 \text{ kg/m}^3$,

• $R_t = 15 - 30 \text{ kPa}$.

Simulyasiya nəticələri göstərmişdir ki:

• Səngəçal seqmentində (0–10 km) deformasiya amplitudası 0.8–1.0 mm intervalında dəyişir; bu sahə ən stabil zonadır.

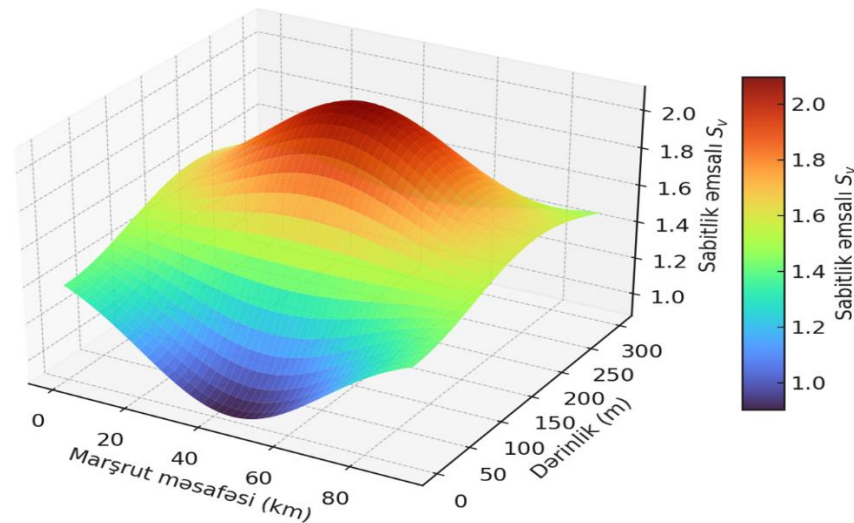
• Marşrutun orta hissəsində (10–45 km) deformasiya amplitudası 1.5–2.2 mm səviyyəsinə yüksəlir; lil çöküntüləri artdığı üçün orta riskli sahə hesab olunur.

• Şahdəniz istiqamətindəki dərin seqmentlərdə (45–92 km) deformasiya amplitudası 2.8–3.4 mm intervalına çatır; bu zona kritik deformasiya həddinə yaxın ərazi kimi qiymətləndirilir.

Bu fərq torpaq müqavimətinin azalması ilə birbaşa əlaqədardır və sabitlik əmsalının $S_n = 1.0$ sərhədinə yaxınlaşdığını göstərir.

MATLAB qrafik modulu vasitəsilə borunun vertikal profili ($S_n < 1.0$) funksiyası ilə modelləşdirilmiş və torpaq növləri rəng kodlaşdırması ilə fərqləndirilmişdir. Qrafikdə yaşıl rəng sabit zonaları, sarı rəng orta risk zonalarını, qırmızı rəng isə kritik ($S_n < 1.0$) sahələri ifadə edir.

Aşağıdakı kod parçası 3D deformasiya xəritəsinin yaradılmasında istifadə olunmuşdur:



Şəkil 2. Boru kəmərinin vertikal yerdəyişmələrinin 3D simulyasiyası (MATLAB nəticəsi, Səngəçal–Şahdəniz marşrutu üzrə)

Sabitlik əmsalı S_y -nin dərinlik və məsafə boyunca dəyişməsi göstərilmişdir: qırmızı zonalar lokal sabitlik azalmasını, mavi və yaşıl sahələr isə stabil sahələri ifadə edir. 3D simulyasiyanın nəticələri göstərmişdir ki, Xəzər dənizinin cənub-qərb sektorunda boru kəmərinin vertikal yerdəyişməsi dərinlik və torpaq müqavimətindən asılı olaraq dalğavari şəkildə dəyişir. Ən yüksək deformasiya Şahdəniz istiqamətində dərinliyin artdığı seqmentdə müşahidə edilmiş və bu sahədə sabitlik əmsalının orta dəyəri 0.92–0.95 arasında dəyişmişdir.

Nəticə

Aparılmış tədqiqat Xəzər dənizində sualtı boru kəmərlərinin şaquli sabitliyini qiymətləndirmək üçün yeni, çoxfaktorlu metodikanın elmi əsaslarını formalaşdırmışdır. MATLAB və ArcGIS platformalarının integrasiyası ilə aparılan modelləşdirmə göstərmişdir ki, boru kəmərlərinin vertikal davranışı yalnız hidrostatik və qravitasiya balansı ilə deyil, həm də dəniz dibinin mexaniki müqaviməti, torpaq qatlarının heterogenliyi, hidrodinamik yüklərin dəyişkənliyi və xarici mexaniki təsirlərin kompleks qarşılıqlı təsiri ilə müəyyən olunur. Səngəçal–Şahdəniz marşrutunun dərin seqmentlərində torpaq müqavimətinin azalması və dalğa-axın təsirlərinin güclənməsi səbəbindən kritik sabitlik zonaları müşahidə edilmiş, vertikal deformasiya

amplitudu 2.8–3.4 mm, sabitlik əmsalı isə 0.92–0.95 intervalında dəyişmişdir. 3D simulyasiya və GIS xəritələşdirməsi boru kəmərinin lokal bükülmə və elastik titrəyişlərini vizuallaşdıraraq, izolyasiya qatının gücləndirilməsi, beton örtük tətbiqi və ankerləşdirmə tədbirlərinin mühüm olduğunu sübut etmişdir. Bu yanaşma yalnız statik deyil, həm də dinamik və məkan dəyişkənliyini nəzərə alan kompleks qiymətləndirmə prinsiplərini təqdim edir və sualtı boru kəmərlərinin uzunmüddətli etibarlılığının təmin olunması üçün elmi əsas yaradır.

ƏDƏBİYYAT SİYAHISI:

1. Bai, Y., & Moan, T. (2012). On the buckling behaviour of offshore pipelines. *Marine Structures*, 26, 32–54. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.12.003>
2. Əliyev, V. M., & İsmayilov, İ. N. (2019). *Xəzər dənizinin mühəndis-geoloji və hidrotexniki şəraiti*. Bakı: Nafta-Press.
3. İsmayilova, S. R. (2022). Xəzər dənizində boru kəmərlərinin istismarı zamanı risklərin modelləşdirilməsi. *SOCAR Proceedings*, 3, 65–72.
4. Popescu, R., Sava, D., & Petrescu, L. (2021). Numerical modelling of submarine pipeline stability under hydrodynamic loading. *Ocean Engineering*, 236, 109470. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109470>

5. Qasimov, N., & Əliyev, F. (2021). Xəzər dənizində sualtı mühəndis qurğularının dayanıqlıq problemləri. *Azərbaycan Geologu*, 2, 45–58.

6. Randolph, M. F., & White, D. J. (2011). Mechanics of pipe-soil interaction for submarine pipelines. *Marine Structures*, 24, 315–334. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.03.004>

Nurlan Elshad ABDULLAZADE

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Phd

E-mail: abdullazadanurlan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3369-8657>

METHODOLOGICAL APPROACH TO ASSESS VERTICAL STABILITY OF SUBMARINE PIPELINES IN THE CASPIAN SEA

Summary

Research Objective: The main objective of this article is to assess the vertical stability of the submarine pipelines along the Sangachal–Shah Deniz route in the Caspian Sea and identify critical zones. The research is aimed at developing effective approaches to ensure the long-term reliability of the pipeline.

Research Method: The research was conducted using a multifactorial methodology based on the integration of MATLAB and ArcGIS software. The vertical stability coefficient (S_9) of the pipe segments was calculated based on bathymetric data, soil resistance, soil slope and water density parameters. The effects of hydrodynamic wave and flow forces, soil heterogeneity and external loads were also modeled.

Research Results: 3D simulation results showed that the deformation in the Sangachal segment varies in the range of 0.8–1.0 mm, in the middle part of the route - 1.5–2.2 mm, and in the Shah Deniz direction - 2.8–3.4 mm. In deep segments, the stability coefficient decreases to 0.92–0.95. These results prove that the vertical stability of the pipeline mainly depends on the interaction of hydrodynamic forces and soil resistance. The proposed methodology provides an effective tool for identifying critical zones and ensuring long-term reliability.

Keywords: Pipelines, vertical stability, hydrodynamic forces, soil resistance, modeling methods

Нурлан Эльшад АБДУЛЛАЗАДЕ

Азербайджанский Государственный Университет Нефти И Промышленности

Докторант

E-mail: abdullazadanurlan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3369-8657>

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Резюме

Цель исследования: Основной целью данной статьи является оценка вертикальной устойчивости подводных трубопроводов по маршруту Сангачал–Шах-Дениз в Каспийском море и выявление критических зон. Исследование направлено на разработку эффективных подходов для обеспечения долгосрочной надежности трубопровода.



Метод исследования: Исследование проводилось с использованием многофакторной методологии, основанной на интеграции программного обеспечения MATLAB и ArcGIS. Коэффициент вертикальной устойчивости (S_9) участков трубопровода рассчитывался на основе батиметрических данных, параметров сопротивления грунта, уклона грунта и плотности воды. Также было смоделировано влияние гидродинамических волновых и потоковых сил, неоднородности грунта и внешних нагрузок.

Результаты исследования: Результаты трехмерного моделирования показали, что деформация на участке Сангачал варьируется в диапазоне 0,8–1,0 мм, в средней части маршрута – 1,5–2,2 мм, а в направлении Шах-Дениз – 2,8–3,4 мм. На глубоких участках коэффициент устойчивости снижается до 0,92–0,95. Полученные результаты подтверждают, что вертикальная устойчивость трубопровода в основном зависит от взаимодействия гидродинамических сил и сопротивления грунта. Предложенная методология представляет собой эффективный инструмент для выявления критических зон и обеспечения долгосрочной надежности.

Ключевые слова: Трубопроводы, вертикальная устойчивость, гидродинамические силы, сопротивление грунта, методы моделирования.

Daxil olub: 21.10. 2025