

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Амангелді Аружан Ескендірқызы

«Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау
жүйелерінде қолдану»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B06201 – Телекоммуникация білім беру бағдарламасы

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

АУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТжҒТ кафедра меңгерушісі
Т.Ғ.К
Е.Таштай
« 28 » 05 2025 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды
бақылау жүйелерінде колдану»

6B06201 – Телекоммуникация

Орындаған:

Пікір беруші
PhD, зерттеуші профессор
Халықаралық ақпараттық технологиялар
университеті

Б. С. Омаров

« 28 » 05 2025 ж.

А.Е. Амангелді

А.Е. Амангелді

Ғылыми жетекші
PhD докторы,
профессор

Н.К. Смайлов

« 28 » 05 2025 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

6B06201 – Телекоммуникация



Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА

Білім алушы: Амангелді Аружан Ескендірқызы

Тақырыбы: «Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелерінде қолдану»».

Университет ректорының «29» 01 2025ж. № 26 бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі 30 » 04 .2025ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: 1. ГОСТ Р ISO 11551-2015 Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Оптикалық элементтермен лазерлік сәулеленудің жұтылу коэффициентін өлшеу әдістемесі. 2. Оптикалық аспаптарға арналған телескопиялық жүйелер. Ажыратымдылық шегін анықтаудың көрнекі әдісі ГОСТ 15114-78. 3. ГОСТ Р ISO 13694-2010 мәтіні Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Лазер сәулесінің қуаттылық (энергия) тығыздығының таралуын өлшеу әдістері

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

- а) Геотехникалық бақылау жүйелерін талдау, талшықты-оптикалық датчиктердің техникалық сипаттамаларын зерттеу
- ә) Талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері және олардың сипаттамаларын зерттеу
- б) Талшықты-оптикалық датчиктерді практикада қолдану
- в) Талшықты-оптикалық датчиктерді зерттеу және оларды MatLab бағдарламасында математикалық модель көрсету

Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

- Free Space Optical Communication (System Design, Modeling, Characterization and Dealing with Turbulence). cover:10.1515 / 97, year: 2015
- (<https://ieeexplore.ieee.org/>): "Optical communication network analysis and optimization". Analysis and Optimization of the Network Throughput in IEEE 802.15.13 based Visible Light Communication Networks (978-1-6654-0308-5/21 ©2021 IEEE)
- <https://ieeexplore.ieee.org/document/8638446>. Optical Network Performance Analysis through Prediction of Q Factor on Simulated and Validated Dataset, 978-1-5386-7813-8/18/\$31.00 ©2018 IEEE.
- Optimization Technology of Optical Fiber Communication Network Based on Service Classification. Journal of Physics: Conference Series, MSOTA 2020. doi:10.1088/1742-6596/1746/1/012085.
- Applied Mathematical Modelling 35(2011)3345–3354. Optimization of passive optical network planning. Topology optimization for hybrid optical/wireless access networks.
- Z. Dong, F. N. Khan, Q. Sui, K. Zhong, C. Lu and A. P. T. Lau, "Optical Performance Monitoring: A Review of Current and Future Technologies," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 2, pp. 525-543, 15 Jan.15, 2016 is available at <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2480798>.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Геотехникалық бақылау жүйелерін талдау, талшықты-оптикалық датчиктердің техникалық сипаттамаларын зерттеу	07.02.2025	орындалды
Талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері және олардың сипаттамаларын зерттеу	24.03.2025	орындалды
Талшықты-оптикалық датчиктерді практикада қолдану	20.04.2025	орындалды
Талшықты-оптикалық датчиктерді зерттеу және оларды MatLab бағдарламасында математикалық модель көрсету	26.04.2025	орындалды.

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған
Қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Н.К.Смайлов PhD доктор, профессор	13.03.2025	Н.К.Смайлов
Теориялық ақпарат	Н.К.Смайлов PhD доктор, профессор	20.04.2025	Н.К.Смайлов
Норма бақылау	PhD доктор, аға оқытушы Досбаев.Ж.М	19.01.2025	Досбаев.Ж.М

Ғылыми жетекшісі профессор Н.К.Смайлов Н.К. Смайлов

Тапсырманы орындауға алған білім алушы А.Е. Амангелді А.Е. Амангелді
Күні «02» 02 2025 ж.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыста телекоммуникациялық инфрақұрылымдарда талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Зерттеу барысында талшықты оптикалық датчиктың жұмыс істеу принциптері, құрылымдық түрлері және оларды байланыс желілерін нақты уақыт режимінде бақылау үшін қолданудың тиімділігі сарапталады. Жобада оптикалық сенсорлар арқылы қысым, діріл, температура сынды параметрлерді тіркеу арқылы апаттардың алдын алу, техникалық ақауларды жедел анықтау және жүйе сенімділігін арттыру жолдары ұсынылады. Сонымен қатар, талшықты оптикалық датчик енгізудің техникалық сызбасы мен алгоритмі жасалып, жүйенің экономикалық және эксплуатациялық тиімділігі дәлелденеді. Ұсынылған шешімдер телекоммуникация саласында қауіпсіз, тиімді және заманауи мониторинг жүйесін қалыптастыруға бағытталған.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассматриваются возможности применения волоконно-оптических датчиков в телекоммуникационной инфраструктуре. В ходе исследования проанализированы принципы их работы, конструктивные типы, а также эффективность использования таких датчиков для мониторинга состояния сетей связи в режиме реального времени. В проекте предлагаются решения по регистрации параметров, таких как давление, вибрация и температура с помощью оптических сенсоров, что позволяет своевременно выявлять технические неисправности, предотвращать аварийные ситуации и повышать надёжность системы. Кроме того, разработана техническая схема внедрения датчиков и алгоритм их функционирования, обоснована экономическая и эксплуатационная эффективность предложенной системы. Представленные в работе решения направлены на формирование безопасной, эффективной и современной системы мониторинга в сфере телекоммуникаций.

ABSTRACT

This diploma thesis explores the potential application of fiber-optic sensors in telecommunication infrastructure. The study analyzes the principles of operation, structural types, and the effectiveness of using such sensors for real-time monitoring of communication networks. The project proposes solutions for detecting parameters such as pressure, vibration, and temperature using optical sensors, which enables timely identification of technical faults, prevention of emergencies, and enhancement of system reliability. In addition, a technical implementation scheme and operational algorithm for these sensors have been developed, and the economic and operational efficiency of the proposed system is justified.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Талшықты-оптикалық датчиктердің теориялық негіздері	10
1.1 Талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымы және жұмыс принципі	10
1.2 Талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері және олардың сипаттамалары	16
1.3 Геотехникалық бақылау жүйелерінде қолданылатын датчиктердің ерекшеліктері	20
2 Геотехникалық құрылымдардағы деформациялар мен кернеулерді өлшеуде талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану	24
2.1 Геотехникалық нысандардағы кернеу, температура және деформация өлшеу әдістері	24
2.2 Талшықты-оптикалық датчиктердің геотехникалық құрылымдардағы жұмыс принципі	28
2.3 Талшықты-оптикалық датчиктерін қолданудың артықшылықтары мен шектеулері	31
3 Талшықты-оптикалық датчиктерді практикада қолдану	34
3.1 Геотехникалық құрылымдарға талшықты-оптикалық датчиктерді орнату әдістемесі	34
3.2 Датчиктерді модельдік зерттеу және олардың тиімділігін бағалау	35
Қорытынды	42
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	44

КІРІСПЕ

Ақпараттық-коммуникациялық технологиялардың жедел дамуы мен цифрлық экономиканың барлық салаларға енуі телекоммуникация саласына деген сұранысты күрт арттырды. Атап айтқанда, мемлекеттік мекемелерден бастап, ірі корпорациялар мен шағын бизнеске дейін, әртүрлі деңгейдегі ұйымдар үшін телекоммуникациялық желілер - мәлімет алмасудың, байланыс орнатудың және ақпаратты қауіпсіз тасымалдаудың басты арнасы болып отыр. Мұндай жағдайда желілердің үздіксіз жұмыс істеуі, олардың техникалық жағдайының сенімділігі, ақауларды жедел анықтау мен алдын алу шаралары бірінші орынға шығады.

Осы орайда телекоммуникациялық жүйелерді нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік беретін заманауи, интеллектуалды технологиялардың маңызы артуда. Бұл бағытта ерекше назарға іліккен құралдардың бірі – талшықты-оптикалық датчиктер. Талшықты-оптикалық технологиялар бастапқыда тек мәлімет тасымалдау үшін қолданылса, бүгінде оларды бақылау, мониторинг жүргізу және қауіпсіздік мақсатында пайдалану жағы да кеңейіп келеді. Бұл датчиктер ақпаратты тек қана жылдам және сенімді түрде жеткізіп қоймай, сонымен қатар байланыс желілерінің бойында болып жатқан физикалық өзгерістерді мысалы, температура ауытқуы, қысым, діріл, майысу, кернеу дәл анықтап, автоматты түрде сигнал бере алады.

Талшықты-оптикалық датчиктер - бұл талшық арқылы өтетін жарық толқындарының қасиеттерін тіркеу арқылы әртүрлі сыртқы әсерлерді сезетін және тіркейтін интеллектуалды құрылғылар. Олардың жоғары сезімталдығы, үлкен қашықтықта бақылау жүргізу мүмкіндігі және электромагниттік әсерлерге төзімділігі оларды басқа дәстүрлі сенсорлардан ерекшелендіреді. Сонымен қатар, олар күрделі инфрақұрылымдарда - туннельдерде, жер асты байланыс желілерінде, магистральдық оптикалық желілерде, сонымен қатар теңіз түбіндегі байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылады.

Қазақстанның телекоммуникация саласы соңғы жылдары айтарлықтай дамып келеді. Ел аумағында оптикалық талшықтар арқылы байланыс желілері тартылып, шалғай елді мекендерге де интернет пен цифрлық қызметтер қолжетімді бола бастады. Бұл үдеріс өзімен бірге жаңа технологияларды ендіру қажеттілігін туындатады. Дәстүрлі түрде қолданыста болған кабельдерді тексеру әдістері енді жеткіліксіз болып барады, себебі олар уақыт пен ресурсты көп талап етеді әрі нақты диагностика бермейді. Осы мәселелерді тиімді шешудің жолы ретінде талшықты-оптикалық датчиктерді енгізу ұсынылады.

Дипломдық жұмыстың басты мақсаты - талшықты-оптикалық датчиктердің телекоммуникациялық инфрақұрылымдардағы жұмысын терең зерттеу, оларды қолданудың тиімділігін дәлелдеу және нақты техникалық шешімдер ұсыну. Бұл мақсатқа жету барысында датчиктердің теориялық негіздері, техникалық сипаттамалары мен жұмыс істеу принциптері егжей-тегжейлі талданады. Сонымен қатар, телекоммуникациялық желілерге ТОД енгізудің құрылымдық моделі жасалып, олардың көмегімен қандай

параметрлерді қадағалауға болатыны нақты көрсетіледі.

Осы мақсатты жүзеге асыру үшін келесі міндеттер қойылады:

- Талшықты-оптикалық датчиктердің физикалық негізін, яғни жарық толқындарының интерференциясы мен сынуы сияқты құбылыстарды зерттеу;
- ТОД-тың құрылымдық түрлерін – нүктелік және таралған датчиктерді салыстыра отырып, олардың артықшылықтары мен қолдану салаларын сипаттау; Телекоммуникациялық инфрақұрылымның қазіргі жағдайына талдау жасап, оның әлсіз тұстарын анықтау;
- датчиктерді нақты желілік құрылымға енгізудің техникалық сызбасын әзірлеу; Алынған мәліметтерді өңдеудің алгоритмдерін құру, яғни қандай жағдайлар жүйеде ақау екенін автоматты түрде анықтап, хабар беретіндей ету;
- жүйенің техникалық және экономикалық жағынан қаншалықты тиімді екенін есептеп, салыстырмалы анализ жасау.

Аталған дипломдық жұмыстың маңыздылығы - ол телекоммуникация саласындағы қауіпсіздік, тиімділік және үнемділік мәселелерін кешенді түрде шешуге бағытталған. Зерттеу нәтижесінде алынған ұсыныстар мен жобалық шешімдер байланыс операторлары, инженерлер, техникалық қызмет көрсету мамандары үшін әдістемелік құрал қызметін атқара алады. Сонымен қатар, бұл жұмыс болашақ ғылыми ізденістерге, яғни "ақылды желілер", деректерді автоматты өңдеу, жасанды интеллект арқылы бақылау жүйелерін енгізу сияқты бағыттарға негіз бола алады.

Осы дипломдық жобадан күтілетін негізгі нәтижелердің бірі - талшықты-оптикалық датчиктерді телекоммуникациялық желілерге тиімді ендірудің нақты үлгісін жасау, оның техникалық сипаттамаларын көрсету және қолданудың артықшылықтарын дәлелдеу болып табылады. Нәтижесінде, желілік мониторинг жүйесінің жұмысын жаңғыртуға, техникалық ақауларды дер кезінде анықтап, үлкен апаттардың алдын алуға жол ашылады. Сонымен қатар, ұсынылған жүйе телекоммуникация операторлары үшін экономикалық жағынан тиімді болмақ, себебі ол қызмет көрсету шығындарын қысқартып, желінің жұмысын үнемі бақылауда ұстауға мүмкіндік береді.

1 Талшықты-оптикалық датчиктердің теориялық негіздері

1.1 Талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымы және жұмыс принципі

Алғашында телекоммуникация саласында кеңінен қолданылған оптикалық талшықтар, өздерінің физикалық сипаттамаларының арқасында, кейіннен лазерлік жүйелер мен сенсорлық технологиялар секілді салаларда да үлкен қызығушылық тудырды. Оптикалық талшықтардың шағын өлшемі диаметрі шамамен 125 мкм, электромагниттік әсерлерге төзімділігі, инерттілігі және қатал ортада жұмыс істеу қабілеті оларды сенсорлық технологияларда қолдануға аса тиімді құралға айналдырды.

Бүгінде талшықты-оптикалық сенсорлар температура, деформация, қысым, химиялық концентрация секілді физикалық параметрлерді талшықтың бүкіл ұзындығы бойынша бөлінген түрде өлшей алады. Мұндай сенсорлардың өлшеу ұзындығы бірнеше сантиметрден бірнеше ондаған километрге дейін жетіп, кеңістіктік ажыратымдылығы миллиметр деңгейінде бола алады.

Тағы бір маңызды артықшылығы – бір ғана талшық бойымен мыңдаған сезімтал нүктелер орнатуға мүмкіндік беруі. Бұл әсіресе шашырау құбылыстарына негізделген таралған сенсорлар арқылы жүзеге асады мысалы, 1 000 000-нан астам өлшеу нүктесі. Сонымен қатар, Fiber Bragg Grating (FBG) технологиясы көмегімен мыңдаған нүктелерді мультиплексирлеуге болады.

Дегенмен, бұл сенсорлық жүйелердің негізгі шектеулерінің бірі - өлшеу нәтижелерін тіркеуге арналған интеррогатор жабдықтарының салыстырмалы түрде жоғары құны. Алайда көптеген өлшеу нүктелері қажет болатын жағдайларда бұл технология экономикалық жағынан тиімді бола алады [1].

Қазіргі қоғамда ақпараттың маңызы мен оны басқару қабілеті өркениеттің даму деңгейін айқындайтын басты факторлардың біріне айналды.

Талшықты-оптикалық датчиктер қазіргі заманғы ғылым мен техниканың түрлі салаларында кеңінен қолданылып жатқан озық технологиялардың бірі болып табылады. Бұл технологияның даму тарихы XX ғасырдың бірінші жартысында, яғни икемді эндоскоптардың жасалуымен тығыз байланысты. Сол кезде медицина саласында адам ағзасының ішкі құрылымын инвазивті емес әдіспен зерттеуге мүмкіндік тудырған алғашқы оптикалық жүйелер пайда болып, бүкіл медициналық диагностиканың дамуына елеулі серпін берген болатын. Бұл жаңалық денсаулық сақтау саласында төңкеріс жасап, қазіргі күнге дейін өзінің өзектілігін жоғалтқан емес. Бұл кезеңде оптикалық талшықтар телекоммуникация саласында - әсіресе алыс қашықтықтағы жоғары жылдамдықты байланыс жүйелерін орнату мақсатында кеңінен қолданыла бастады. Сол уақыттан бері бұл технология өз дамуының қарқынды және экспоненциалды өсу кезеңіне өтті. Оптикалық-талшықты датчиктердің сезімталдық негізінде жасалған қолданбалары осы байланыс технологиясының бір тармағы ретінде пайда болды. Олар көбінесе оптоэлектрондық компоненттер мен олардың жаңа буындағы модульдерінің дамуының нәтижесінде жүзеге аса

бастады.

Талшықты-оптикалық байланыс жүйелері тек қана ақпарат алмасу жылдамдығы мен сапасын арттырып қоймай, сонымен қатар телекоммуникация саласына мүлдем жаңа мүмкіндіктер сыйлады. Бұл жүйелердің көмегімен мәліметті ұзақ қашықтыққа жоғалтусыз жеткізу мүмкіндігі туды, ал өткізу қабілетінің құны жылдан-жылға төмендеп, бұл технологияны қолжетімді етті. Компоненттердің өндірістік бағасының арзандауы мен сапалық сипаттамаларының жақсаруы арқасында, талшықты-оптикалық сенсорлардың дәстүрлі электрлік датчиктерді алмастыру қабілеті күн өткен сайын артып келеді [2].

Бұл технологияның артықшылықтары өте көп және айқын. Солардың ішіндегі ең маңыздысы - электромагниттік кедергілерге абсолютті төзімділік. Бұл қасиет әсіресе өнеркәсіптік, теміржол, авиациялық және әскери салаларда аса маңызды. Сонымен қатар, олар өте жеңіл, ықшамды, шағын көлемді, сезімталдығы жоғары, экстремалды температуралық жағдайларға төтеп бере алады, химиялық әсерлер мен коррозияға ұшырамайды. Мұнымен қоса, оптикалық талшықтар арқылы берілетін ақпарат көлемі өте үлкен, яғни олар үлкен өткізу қабілеттілігіне ие.

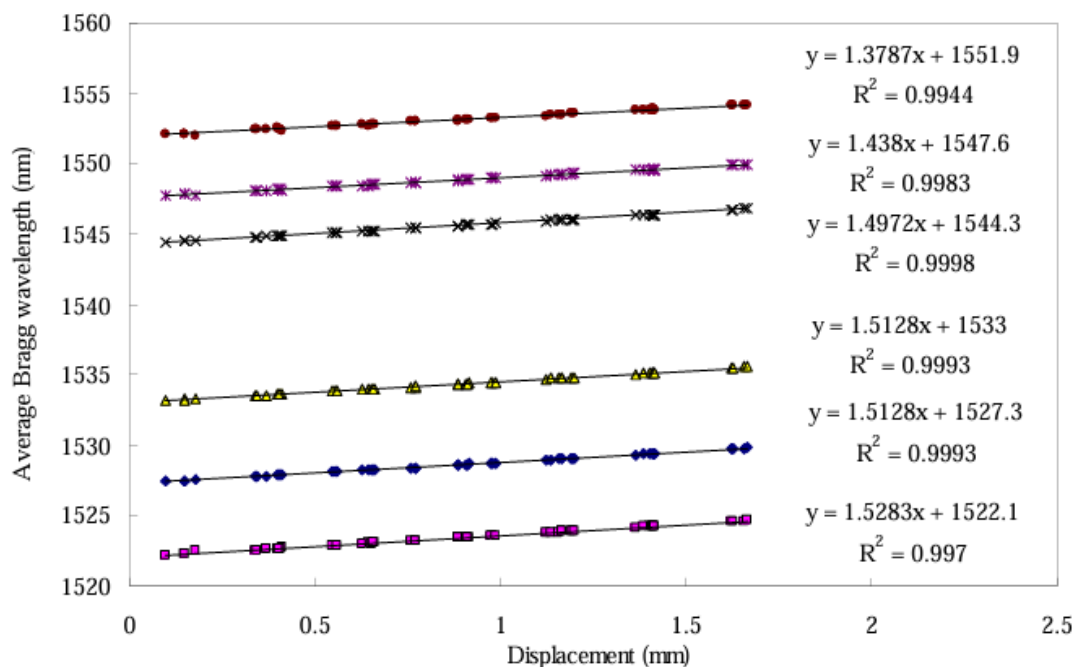
FOS Fiber Optic Sensors технологиясы туралы көптеген ғылыми шолу мақалалар жарық көрді, олардың қатарында азаматтық құрылыс, көпірлер, бөгеттер, құбырлар және геотехникалық құрылымдардағы қолданыстар ерекше атап өтіледі. Мысалы, кейбір зерттеулерде тек көпірлерге бағытталған қолданбалар қарастырылса, қазіргі таңда бұл технология зертханалық эксперименттерде, динамикалық жүктемелерді зерттеуде, нақты уақыттағы бақылау жүйелерінде белсенді түрде қолданылады. Сонымен қатар, мұндай жүйелердің практикалық енгізілуіндегі негізгі мәселелер мен болашағы да ғылыми тұрғыдан зерделенуде.

Талшықты-оптикалық сенсорлар телекоммуникация желілерінде маңызды компонент болып табылады. Бұл сенсорлар оптикалық талшықтар арқылы берілетін ақпараттың сапасын және жылдамдығын жақсартуға мүмкіндік береді. Талшықты-оптикалық жүйелердің ең үлкен артықшылығы - олардың жоғары өткізу қабілеті мен арнайы сигналдарды қабылдау мүмкіндігі. Қазіргі заманғы телекоммуникациялық желілерде бұл сенсорлар интернет қызметтерінің жылдамдығын арттыру және деректерді жоғалтпай жеткізу үшін қолданылады [3].

Талшықты-оптикалық сенсорлар қашықтықтан мониторинг жүйелерін құру үшін өте қолайлы. Мысалы, бұл сенсорлар кабельдік жүйелер мен байланыс құрылғыларын бақылап, олардың жағдайы туралы нақты уақыт режимінде мәліметтер ұсына алады. Талшықты-оптикалық сенсорлар телекоммуникациялық инфрақұрылымның кез келген зақымдануы немесе ақауларын анықтауға мүмкіндік береді, бұл уақытылы жөндеу жұмыстарын жүргізу үшін өте маңызды.

Талшықты-оптикалық сенсорлар қоршаған ортаға өте сезімтал және сыртқы әсерлерге, әсіресе электромагниттік интерференцияға қарсы

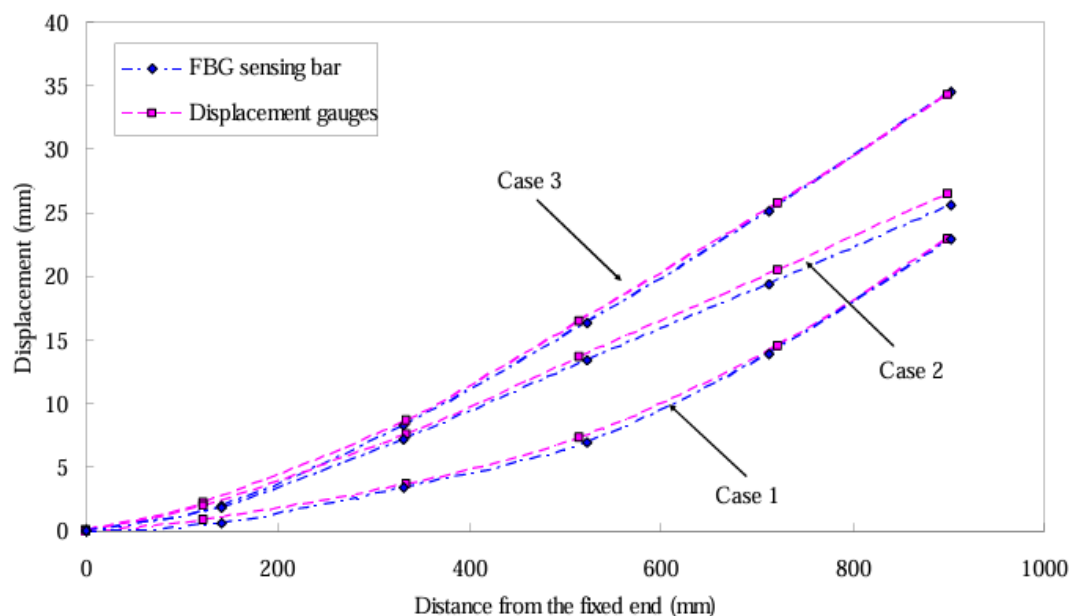
қорғанышты ұсынады. Электрлік сенсорлар сыртқы электрлік шуға әсер етуі мүмкін, бірақ талшықты-оптикалық сенсорлар мұндай шуларға төзімді болып келеді. Бұл олардың телекоммуникациялық жүйелерде пайдалануға өте ыңғайлы болуын қамтамасыз етеді [4].



1.1-сурет – FBG сенсорларының Брэгг толқын ұзындығы мен ығысу арасындағы сызықтық тәуелділігі

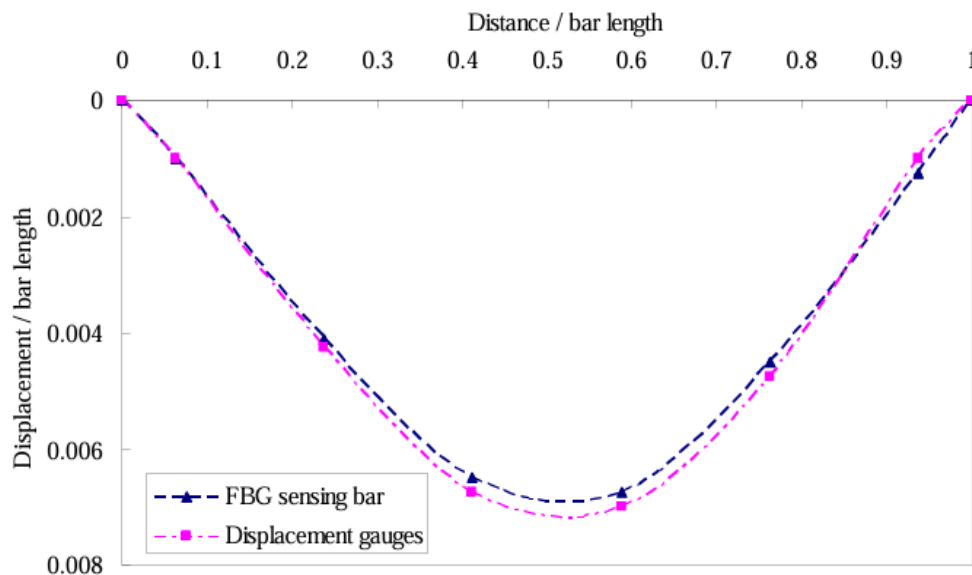
Бұл графикте әртүрлі Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорларының Брэгг толқын ұзындығының (Average Bragg Wavelength) және механикалық ығысуының (Displacement) арасындағы сызықтық байланысы көрсетілген.

Талданған нәтижелер көрсеткендей, Bragg толқын ұзындығының өзгерісі ығысуға тура пропорционал, яғни құрылымдағы кернеу немесе деформация артуымен сәйкесінше толқын ұзындығы да артады. Бұл құбылыс FBG сенсорларын жоғары дәлдіктегі құрылымдық мониторингке (мысалы, геотехникалық құрылыстарда, көпірлерде, ғимараттарда) тиімді қолдануға мүмкіндік береді [5].



1.2-сурет – FBG және өлшеуіштер арасындағы ығысу салыстыруы

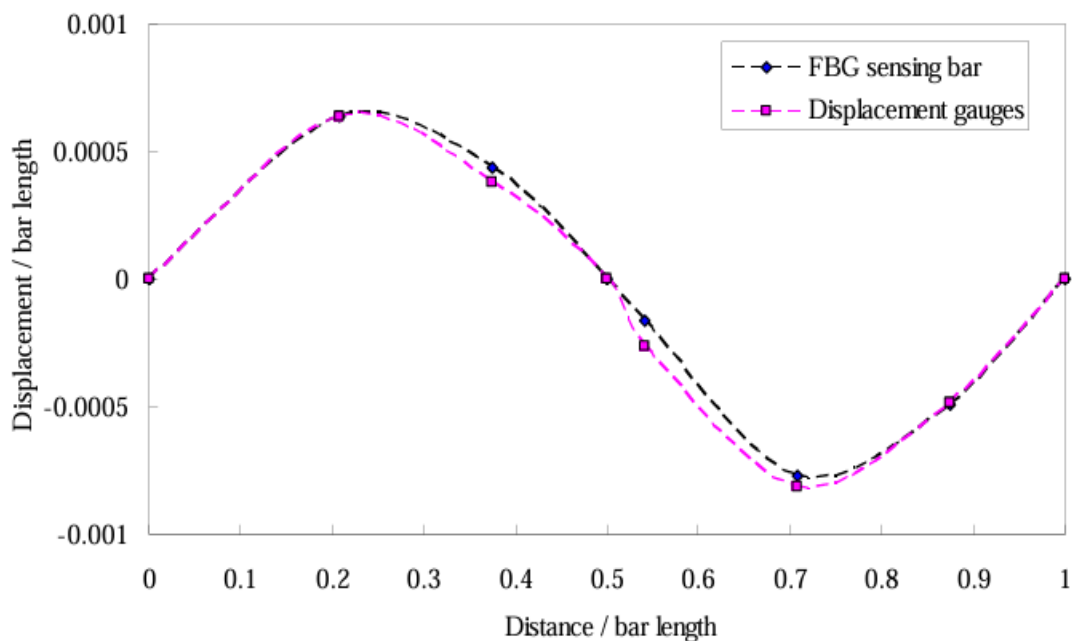
Бұл графикте FBG сезгіш штангасы (көк сызық) мен ығысу өлшегіштерінің (қызғылт сызық) өлшеу нәтижелері салыстырылған. Горизонталь ось - бекітілген шеттен арақашықтық (мм), вертикаль ось - ығысу (мм). Үш түрлі жағдай (Case 1, 2, 3) көрсетілген. Барлық жағдайларда екі әдістің нәтижелері бір-біріне өте жақын, бұл олардың өлшеу дәлдігінің жоғары екенін көрсетеді.



1.3-сурет – FBG және өлшеуіштер арқылы анықталған симметриялы иілу

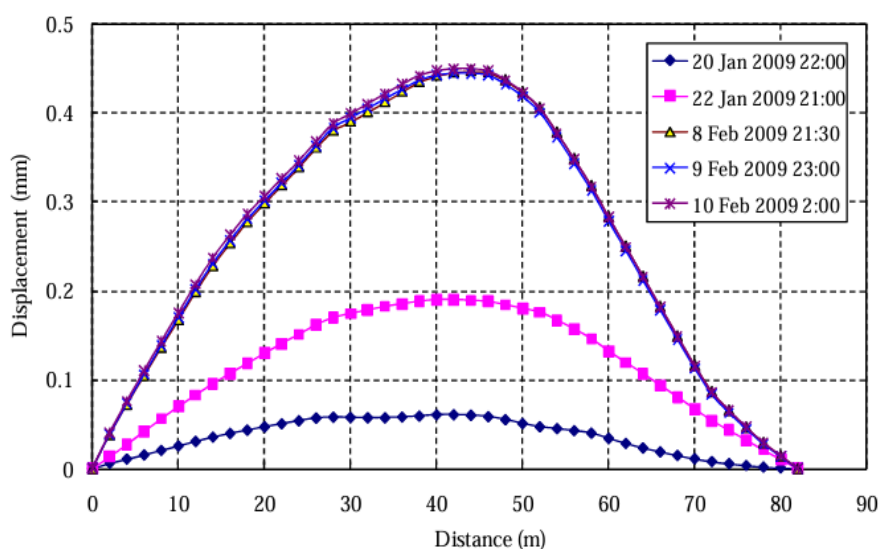
FBG сезгіш штангасы мен дәстүрлі ығысу өлшегіштерінің көрсеткіштері бір-біріне өте ұқсас, симметриялы қисықтар береді. Ең үлкен ығысу штанганың

ортасында байқалады, ал шеттерде ығысу нөлге жуық. Бұл штанганың симметриялы иілуін сипаттайды.



1.4-сурет – FBG және дәстүрлі әдіспен анықталған салыстырмалы тербеліс

График синус тәрізді тербелісті сипаттайды. Екі әдістің (FBG sensing bar және displacement gauges) өлшем нәтижелері өзара жақсы сәйкестік көрсетеді. Бұл динамикалық немесе тербелмелі жүктеме әсерін көрсететін жағдай.



1.5-сурет – Құрылымдағы деформацияның уақыттық динамикасы

Бұл графикте әртүрлі уақыт аралығында штанга бойымен тіркелген ығысу шамаларының (displacement) өзгерісі көрсетілген. Горизонталь осьте - штанга ұзындығы бойынша арақашықтық (м), ал вертикаль осьте - ығысу мәні (мм) бейнеленген.

Анализ нәтижелеріне сәйкес, барлық жағдайларда штанганың екі шетінде ығысу шамасы нөлге жуық, ал ең үлкен ығысу оның орталық бөлігінде байқалады. Бұл штангаға түсірілген жүктеменің нәтижесінде пайда болатын иілу сипатындағы деформацияны білдіреді.

Қазіргі таңда 5G және болашақтағы 6G телекоммуникациялық жүйелері үшін талшықты-оптикалық сенсорлар үлкен мүмкіндіктер береді. 5G желісінің жұмысы жоғары өткізу қабілетін талап етеді, және талшықты-оптикалық сенсорлар осы сұранысты қанағаттандыру үшін тиімді құрал болып табылады. Бұл сенсорлар жоғары жылдамдықты деректерді беру, кідіріссіз байланыс орнату және көпқабатты байланыс құрылғыларын пайдалану үшін қажетті инфрақұрылымның негізін қалайды.

Талшықты-оптикалық сенсорлар телекоммуникация саласында қауіпсіздік жүйелерін дамыту үшін маңызды рөл атқарады. Олар деректерді шифрлау мен қауіпсіз жеткізуді қамтамасыз ету үшін қолданылуы мүмкін. Сондай-ақ, бұл сенсорлар желілерде ақауларды анықтауға және оларды алдын-ала болжауға көмектеседі, бұл үлкен телекоммуникациялық жүйелердің үздіксіз жұмысын қамтамасыз етеді [6].

Талшықты-оптикалық сенсорлар телекоммуникация жүйелерінде ақпаратты жоғары жылдамдықпен тасымалдау мен тиімді бақылау мүмкіндігін қамтамасыз ете отырып, осы салада үлкен өзгерістер әкелуде. Бұл технологияны пайдалану телекоммуникациялық инфрақұрылымдардың сенімділігін арттырып, олардың ұзақ мерзімді қызмет етуін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық сенсорлар 5G және болашақ 6G жүйелерінің дамуына ықпал ететін негізгі компоненттер болып табылады.

Талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымы мен жұмыс принципі заманауи бақылау және мониторинг жүйелерінде маңызды орын алады. Бұл датчиктер негізінен үш негізгі компоненттен тұрады: оптикалық талшық, оптикалық көз және оптикалық детектор. Оптикалық талшық - жарықтың таралуын қамтамасыз ететін негізгі элемент болып табылады, ол әдетте әйнектен немесе арнайы оптикалық материалдардан жасалады. Талшықтың ішінде жарықтың жылдамдығы жоғары болғандықтан, ол ұзақ қашықтыққа сигналдарды жібере алады. Талшықты-оптикалық датчиктер негізінен көпмодалы немесе бірмодалы болады, бұл олардың түріне және қолданылатын талшықтың диаметріне байланысты.

Оптикалық көз - бұл датчиктің жарық көзі болып табылады. Әдетте, лазерлер немесе жарық диодтары (LED) пайдаланылады. Бұл көздер жарық импульсін немесе үздіксіз сәулені шығарады, ол оптикалық талшық арқылы беріледі. Құрылғының сенсорлы бөлігіне жарық сәулесінің түсуі және қайта шағылуы, тарқалуы немесе сынуы арқылы ақпарат беріледі. Оптикалық детектор - жарықтың қайтқан немесе өзгерген бөлшектерін қабылдайтын құрылғы. Ол

кабылданған жарық сигналын электрлік сигналға түрлендіреді. Бұл құрылғы сенсордан алынған өзгерістерді нақты уақытта бақылап, нәтижесінде құрылғының жағдайын көрсететін ақпарат береді.

Талшықты-оптикалық датчиктер жұмыс істегенде, жарықтың таралуы мен өзгерісіне негізделеді. Датчиктің жарық көзі талшық арқылы жарық сәулесін жібереді. Егер талшыққа сыртқы күш әсер етсе, мысалы, деформация, қысым немесе температураның өзгеруі, жарықтың таралуы мен сипаттамалары өзгереді. Талшықты-оптикалық сенсор бұл өзгерістерді жарықтың таралуын бақылап анықтайды. Содан кейін өзгерген жарық детекторға жетеді, ол оны электрлік сигналға түрлендіреді. Осы сигнал кейіннен деректер өңдеу жүйесіне жіберіліп, құрылғының нақты күйін бағалауға мүмкіндік береді [7, 8].

Талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері негізінен дискретті және таратылған болып бөлінеді. Дискретті сенсорлар тек белгілі бір нүктелерде ақпарат қабылдайды, ал таратылған сенсорлар оптикалық талшық бойымен көптеген сезімтал нүктелерді пайдаланады. Бұл таратылған сенсорлар құрылымның әртүрлі бөліктеріндегі өзгерістерді ертерек анықтауға көмектеседі, бұл олардың артықшылығы болып табылады.

Талшықты-оптикалық датчиктердің көптеген артықшылықтары бар. Олар жоғары сезімталдыққа ие, өте аз өзгерістерді анықтай алады. Сонымен қатар, олар электромагниттік интерференцияға төзімді болып келеді, сондықтан электрлік сенсорлардан қарағанда тиімдірек. Осы датчиктер ұзақ қашықтықтарға деректерді жоғалтпай жеткізе алады. Олар миниатюризацияланған және икемді болып табылады, сондықтан тар кеңістіктерге оңай орналастырыла алады.

Яғни талшықты-оптикалық датчиктер сенсорлық технологияның маңызды және алдыңғы қатарлы түрлерінің бірі болып табылады. Олар жоғары сезімталдықты, тұрақтылықты және сенімділікті қамтамасыз етіп, көптеген салаларда қолданылуы мүмкін, мысалы, құрылыс, телекоммуникация, медицина және басқа индустрияларда.

1.2 Талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері және олардың сипаттамалары

Талшықты-оптикалық датчиктер - бұл оптикалық талшықтар арқылы сигналдарды тасымалдау принципіне негізделген сенсорлар. Олар негізінен өте жоғары сезімталдыққа ие, шу мен электромагниттік кедергілерге төзімді, сонымен қатар ұзақ қашықтықтан деректерді тасымалдау мүмкіндігін береді. Геотехникалық бақылаулар үшін талшықты-оптикалық сенсорлар көбінесе деформация, температура, және қысым сияқты параметрлерді бақылау үшін қолданылады.

Қолдану салалары: Құрылыс деформациялары: Талшықты-оптикалық датчиктерді құрылыс құрылымдарының деформациясын бақылау үшін қолдануға болады. Бұл әсіресе көп қабатты ғимараттар немесе тоннельдер сияқты үлкен құрылымдардың тұрақтылығын тексеру кезінде маңызды. Топырақ

қозғалысын бақылау: геотехникалық зерттеулер кезінде топырақтың қозғалысын немесе қоныс аударуын бақылау үшін талшықты-оптикалық датчиктер пайдаланылады. Бұл, әсіресе жер сілкінісі немесе басқа да табиғи апаттар кезінде өте маңызды. Су қысымын өлшеу: Геотехникалық құрылыс жұмыстарында су қысымы мен су деңгейінің өзгерісін бақылау үшін талшықты-оптикалық датчиктер қолданылуы мүмкін. Температура бақылауы: Талшықты-оптикалық датчиктер температураның өзгерістерін бақылау үшін қолданылады, бұл әсіресе құрылыс аймақтарында температураның әсерін бақылау үшін маңызды [9].

Артықшылықтары:

- жоғары сезімталдық: Талшықты-оптикалық сенсорлар өте аз деформацияларды, қысымдарды және температуралық өзгерістерді анықтай алады.
- қашықтықтан деректерді жинау мүмкіндігі: Талшықты-оптикалық датчиктер үлкен аумақтарды қадағалау үшін тиімді, себебі олар ұзақ қашықтықта жұмыс істей алады.
- төмен кедергілер: Электрлік және магниттік шудан қорғалғандықтан, бұл датчиктер сенімді әрі дәл жұмыс істейді.
- төзімділік: Талшықты-оптикалық жүйелер сыртқы ортаға төзімді, ұзақ мерзімді пайдалану үшін оңтайлы.

Қолданылу мысалдары:

- геотехникалық бақылау жүйелері: Мысалы, жер қазу жұмыстары, туннель қазу, немесе көп қабатты ғимараттардың негіздерінде топырақтың деформациясы мен қысымының өзгерісін бақылау.
- көлік инфрақұрылымдары: Теміржолдар, көпірлер және жолдардағы құрылымдардың жағдайын бақылау үшін.
- сейсмикалық мониторинг: Жер сілкінісі немесе жер қозғалыстары кезінде құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету.

Талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) қазіргі кезде әртүрлі салаларда, оның ішінде геотехникалық бақылауда да кеңінен қолданылады. Олар жоғары дәлдікпен өлшеу және мониторинг жүргізу үшін өте тиімді және сенімді құрал болып табылады. Геотехникалық бақылау саласындағы ТОД қолданудың артықшылықтары мен мүмкіндіктері көп. Талшықты-оптика негізінде жұмыс істейтін жүйелер тек қана құрылымдардың механикалық қасиеттерін бақылауға ғана емес, сонымен қатар әртүрлі табиғи апаттар мен өзгерістерді ерте кезеңде анықтауға да мүмкіндік береді. Бұл, әсіресе, жер сілкіністері, су тасқындары, жер асты қозғалыстары, көшкіндер мен құрылыс жұмыстарының әсерлерін бақылауда маңызды [10, 11].

Талшықты-оптикалық жүйелер - бұл оптикалық талшықты қолдана отырып, ақпаратты ұзақ қашықтыққа тасымалдау және өңдеу технологиясы. Мұндай жүйелер әртүрлі параметрлерді, мысалы, температура, қысым, кернеу және деформацияны өлшеуге қабілетті. Олар жоғары сезімталдыққа ие және өте төмен энергия шығындарымен жұмыс істей алады, сондықтан олар ұзақ мерзімді бақылау үшін өте тиімді.

Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс принципі негізінен оптикалық

интерферометрия мен жарықтың өзге де қасиеттеріне сүйенеді. Интерферометриялық әдістер талшықты-оптикалық жүйелерде кеңінен қолданылып, оларды өте сезімтал және дәл бақылау жүйелеріне айналдырады. Мысалы, Фабри-Перо, Майкельсон, Брэгг типтегі интерферометрлер белгілі бір физикалық әсерлерді өте жоғары дәлдікпен анықтай алады.

Геотехникалық бақылау саласында талшықты-оптикалық датчиктер жер қыртысындағы деформациялар мен қозғалыстарды дәл бақылауға мүмкіндік береді. Бұл жүйелер жер асты құрылымдарын, қорғаныс қабырғаларын, көпірлерді, туннельдерді және басқа да инженерлік объектілерді бақылау үшін кеңінен қолданылады. Талшықты-оптикалық датчиктер осы объектілерде орын алатын өзгерістерді бақылау және алдын алу үшін өте пайдалы.

Талшықты-оптикалық жүйелер жер асты қозғалыстары мен сейсмикалық толқындарды бақылауда үлкен рөл атқарады. Жер асты қозғалыстарының алдын алу үшін ТОД жер бетінде немесе жер астында орналастырылуы мүмкін. Мұндай жүйелер жиі қолданылатын әдістердің бірі - «distributed acoustic sensing» (DAS), яғни таратылған акустикалық сезгіштер. DAS технологиясы арқылы бүкіл талшықтың бойында механикалық қозғалыстар мен вибрацияларды тіркеуге болады. Бұл жүйелер жер асты қозғалыстарының бағытын, күші мен жылдамдығын өте дәл анықтауға мүмкіндік береді [12].

Талшықты-оптикалық датчиктер табиғи апаттардың алдын алуда да маңызды рөл атқарады. Мысалы, көшкіндер мен су тасқындары кезінде топырақтың және судың қозғалысы өте жоғары дәлдікпен бақыланады. Талшықты-оптикалық жүйелерге орнатылған датчиктер жер бетінің қозғалысын тіркейді, бұл әртүрлі апаттар үшін алдын ала ескерту беру жүйесін құруға мүмкіндік береді. Мұндай жүйелер әсіресе таулы аудандар мен су тасқынына бейім аймақтарда маңызды.

Геотехникалық бақылауда талшықты-оптикалық жүйелер температура мен қысымды бақылауда да қолданылуы мүмкін. Мысалы, жер асты құрылымдарында немесе су қоймаларында температура мен қысымның өзгеруі құрылымдық ақаулар мен қауіпсіздік мәселелерін көрсетеді. Талшықты-оптикалық жүйелер осы параметрлерді үздіксіз және өте дәл бақылауға мүмкіндік береді. Бұндай жүйелер тек құрылымдардың ішіндегі жағдайды ғана емес, сонымен қатар олардың сыртқы әсерлерге қалай жауап беретінін де көрсетеді.

Талшықты-оптикалық жүйелердің ең басты артықшылығы - сигналды үлкен қашықтыққа беру мүмкіндігі. Бұл әсіресе үлкен жерлерде немесе бірқатар құрылымдық объектілерді қадағалау қажет болған жағдайда өте пайдалы [13].

Талшықты-оптикалық датчиктер өте жоғары сезімталдыққа ие, бұл оларды геотехникалық бақылауда маңызды етеді. Олар кез келген физикалық өзгерістерді, мысалы, жер қыртысының қозғалысын, қысым өзгерістерін, температураның көтерілуін дәл тіркейді.

Талшықты-оптикалық жүйелер ұзақ мерзімді пайдалану үшін оңтайлы болып табылады. Олар аз техникалық қызмет көрсетуді қажет етеді, бұл шығындарды азайтуға және жүйелердің үнемді болуына мүмкіндік береді.

Талшықты-оптикалық жүйелер сыртқы әсерлерге, мысалы, электромагниттік өрістерге, суға және температураның өзгеруіне өте төзімді. Бұл оларды ауыр жағдайда қолдануға мүмкіндік береді.

1.5 (а) суретте оптикалық талшық ішінде орын алатын жарық шашырау процесінің сызбасы көрсетілген. Бұл процесс талшық арқылы өтетін жарықтың оның ішкі ортасын құрайтын атомдар мен молекулалармен өзара әсерлесуінің нәтижесінде пайда болады. Талшықтың әрбір бөлігінде жарықтың электр өрісі уақытқа тәуелді электрлік дипольдердің пайда болуына себеп болады, ал бұл өз кезегінде екіншілік жарық толқындарын туындатып, олар талшық бойымен және оның айналасына шашырайды.

Бұл шашыраған жарықтың қуаты бастапқы жарыққа қарағанда әлдеқайда төмен болады, сондықтан ол жарықтың таралуына айтарлықтай әсер етпейді. Алайда шашыраған жарықтың бір бөлігі кері бағытта яғни жарық көзіне қарай таралады - бұл кері шашырау (backscattering) деп аталады және ол талшықтың кез келген нүктесінде бақылануы мүмкін.

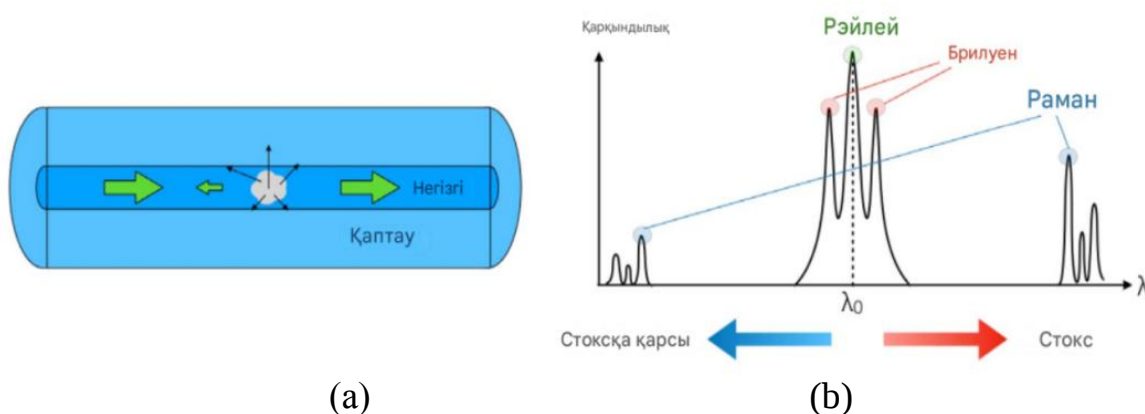
Таратылған талшықты-оптикалық сенсорлар осы кері шашырауды тіркеп, оның қарқындылығындағы өзгерістерді және жиіліктегі ығысуын анықтай отырып, талшық бойындағы физикалық параметрлерді мысалы, температура немесе деформация өлшеуге мүмкіндік береді. Мұндай сенсорлар дәстүрлі талшықты сенсорлардан айырмашылығы — олар талшық бойында арнайы құрылғыларды мысалы, Bragg торлары немесе интерферометрлер орнатуды қажет етпейді. Мұнда бүкіл талшық үздіксіз сезімтал орта ретінде қарастырылады және ол бойымен физикалық шамаларды нақты тіркеуге мүмкіндік береді [14, 15].

Раман шашырауы - серпімді емес шашыраудың айқын мысалы. Бұл құбылыс жарықтың молекулалық тербелістермен өзара әрекеттесуі нәтижесінде пайда болады. Ол оптикалық талшықтағы энергия деңгейлерінің өзгеруіне байланысты туындайды және жиілік бойынша айтарлықтай ығысуға ие. Фарахани және Гоголла, зерттеулерінде мысалы, 1550 нм толқын ұзындығында жұмыс істейтін жүйелерде Стокс және анти-Стокс компоненттері арасындағы жиілік айырмашылығы шамамен 90 нм-ге дейін жетеді. Раман шашырауы, әдетте, тікелей деформация (штамм) өлшеу үшін қолданылмайды. Алайда, ол температураны таратылған түрде бақылауға арналған сенсорлық жүйелердің негізі болып табылады. Бұл жерде өлшеу анти-Стокс және Стокс компоненттерінің қарқындылықтарының арасындағы қатынастың температураға тәуелділігіне негізделеді.

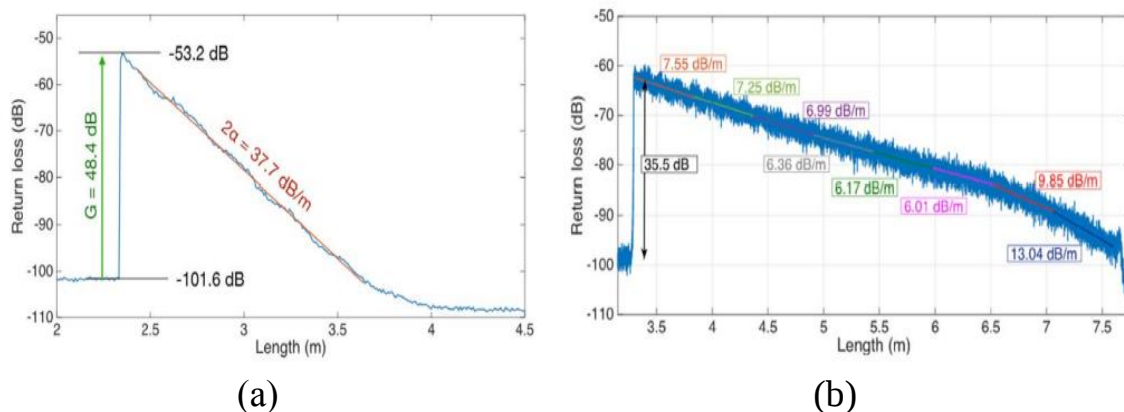
Сәйкесінше, Инауди және Глисичтің Раман шашырауына негізделген зерттеуіне сүйенсек таратылған сенсорлар (Distributed Temperature Sensing Systems - DTSS) инфрақұрылымдық құрылымдарды, атап айтқанда құбырларды, туннельдерді, көпірлерді және электр кабельдерін ұзақ мерзімді термиялық мониторингте кеңінен қолданылып келеді. Бұл сенсорлар жоғары температуралық ажыратымдылықпен, сонымен қатар бірнеше километрге дейін жететін өлшеу диапазонымен ерекшеленеді. Мұндай жүйелерде талшықтың өзі ғана сезгіш орта ретінде қызмет етеді, бұл құрылымдық күрделілікті төмендетіп,

жоғары сенімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Бриллуэн шашырауын пайдаланатын сенсорлық жүйелердің бірі - BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analyzer - Бриллуиндік Оптикалық Уақыт Доменінің Анализаторы). Ли және басқа зерттеушілер 2008 жылы бұл жүйе сезгіш талшықтың екі ұшынан екі бағытта жарық сигналдарын жіберу арқылы талшық бойындағы деформация мен температураны нақты тіркеуге мүмкіндік беретінін көрсеткен болатын. Мұндай жүйелер инженерлік құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету, жер сілкіністерінің әсерін зерттеу, жер қозғалыстарын тіркеу сияқты күрделі міндеттерді орындауда жоғары дәлдік пен сенімділік көрсетіп отыр.



1.6-сурет – (a) Оптикалық талшықта болатын серпімді шашыраудың нобайы. (b) толқын ұзындығына (λ) тәуелділігі. Кіріс сәулесі толқын ұзындығы λ_0 болатын лазер болған кезде оптикалық талшықтардағы шашырау процестері.



1.6-сурет – Жетілдірілген кері шашырау талшықтарының шашырау іздері және OBR құралында талданған қайтарым жоғалту көрсеткіштері әрбір талшық бөлімі бойынша. (a) Жоғары кірісті талшықтың талдауы және шашырауды анықтайтын параметрлер; (b) Талшықтың біржақты әлсіреуі бойынша есеп, ол әрбір бөлімдегі әлсіреу біркелкілігін көрсетеді.

1.3 Геотехникалық бақылау жүйелерінде қолданылатын датчиктердің ерекшеліктері

Жалпы алғанда, жер асты геотехникалық мониторингі әдетте жыныс массасының тұрақтылығын қамтамасыз ету мақсатында деформация/кернеу, орын ауыстыру, кернеулік күй және сейсмикалық белсенділік сияқты бірнеше параметрлерді тіркеуді қамтиды. Алайда, бұл ғылыми жұмыста деформация мен орын ауыстыруды өлшеуге бағытталған сенсорларға ерекше назар аударылады, себебі жыныс массасының шамадан тыс қозғалысы жер асты қазбаларының орнықтылығына төнетін негізгі қауіптердің бірі болып саналады.

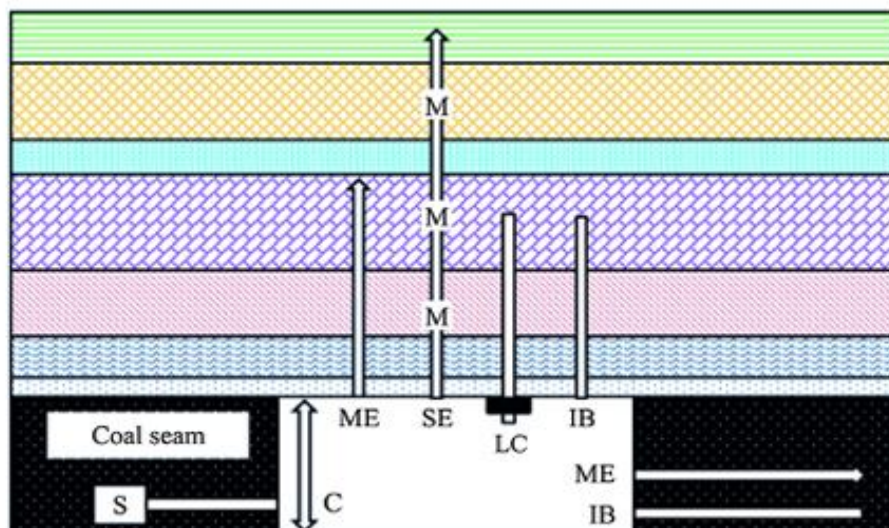
Геотехникалық бақылау аспаптарының түрлері мен орналастырылу сызбалары қазбаның функционалдық мақсатына, жыныс массасының физико-механикалық қасиеттеріне және қолданылатын топырақ бекіту әдістеріне тәуелді. 1.7-суретте жер асты көмір шахталарында жиі қолданылатын жыныс массасының күйін бақылауға арналған негізгі аспаптар көрсетілген.

Конвергенциялық бақылау жүйелері - жер асты қазбасының маңайындағы екі анықтамалық нүкте арасындағы салыстырмалы орын ауыстыруды тіркеуге арналған бақылау құрылғылары. 1.3-суретте кеңінен қолданылатын конвергенциялық индикаторлардың негізгі түрлері көрсетілген. Гхош және Гхош жүргізген зерттеу шеңберінде жаңа қазылған жер асты жолында телескопиялық штангалар көмегімен төбе мен табан арасындағы күнделікті жақындасу қарқыны бір ай бойы бақыланған. Жинақталған бақылау деректерінің кері талдауы негізінде жыныс массасының сапа көрсеткіші (RMR), қазбаның ені және төбе жынысының тығыздығы тәрізді параметрлерге негізделген төбенің шекті жақындасуын болжауға арналған математикалық өрнек ұсынылған.

Конвергенциялық бақылау жүйелерінің басты артықшылығы - оңай орнатылуы. Дегенмен, бұл жүйелер тек беткі қабаттардағы орын ауыстыруды ғана тіркейді, ал жыныс массасының ішкі бөліктеріндегі деформациялар назардан тыс қалуы мүмкін. Сонымен қатар, мұндай құрылғыларды орнату қазба жұмыстарын жүргізу жолдарын шектеп, өндірістік процестерге белгілі бір дәрежеде кедергі келтіруі ықтимал [16].

Жыныс массасына ендірілетін бақылау құрылғылары, мысалы, штангалы, сымды немесе магниттік экстензометрлер, үлкен көлемдегі жыныс массасында әртүрлі тереңдіктерде якорьленген нүктелер арасындағы салыстырмалы орын ауыстыруды дәл өлшеуге мүмкіндік береді. 1.2 -суретте жер асты көмір шахталарында жиі қолданылатын экстензометрлердің екі негізгі түрі бейнеленген.

Мысалы, Австралияның Жаңа Оңтүстік Уэльс штатында орналасқан жер асты көмір шахтасында жүргізілген далалық зерттеулер қабатты құрылымға ие көмір жынысының механикалық қасиеттерін бақылауға бағытталған. Экстензометрлер көмегімен жыныстың терең қабаттарында жүріп жатқан деформация процестері мен орын ауыстырулар дәл тіркеліп, тау жыныстарының тұрақтылық жағдайын кешенді бағалауға мүмкіндік береді.



1.7-сурет – Жер асты көмір шахталарын бақылауға арналған типтік аспаптар. ME Механикалық экстенсометр; SE Sonic зонд; С Конвергенция станциясы; IB аспаптық рок болт; LC Анкерленген жүктеме ұяшығы; S стресс капсуласы

Таратылған талшықты-оптикалық жүйелер арзан телекоммуникациялық деңгейдегі талшықты-оптикалық кабельді сезгіш материал ретінде пайдаланады, ол сезімталдықты анықтау мен деректерді беру қызметін бір уақытта атқарады. Бұл жүйе талшық бойымен көптеген нүктелік өлшемдерді алу үшін тиімді болып табылады, өйткені ол шашыраған жарықтың оптикалық қасиеттеріне негізделген. Раман шашырауы тек температураның өзгеруінен туындайды және ол жарықтың интенсивтілігімен реттеледі. Бриллюэн шашырауын сезу принципі көптеген зерттеулерде қарастырылған. Бриллюэн сезгіштік жүйелері екі негізгі топқа бөлінеді: Бриллюэн оптикалық уақыттық доменді кері шағылысу (BOTDR) және Бриллюэн оптикалық уақыттық доменді талдау (BOTDA). BOTDR жүйесі бір талшықтың бір ұшына импульс жіберіп, сол ұшынан артқа шашыраған жарықты бақылайды. Ал BOTDA жүйесі циклически ұйымдастырылған талшықты қажет етеді, мұнда үздіксіз лазерлік насос жарығы мен импульстік жарықтың өзара әрекеттесуі арқылы үлкен шашырау тиімділігі мен күшейтілген сигнал алынады. BOTDR жүйесі BOTDA-дан артықшылығымен ерекшеленеді, өйткені ол тек бір ұшын қажет етеді. Егер талшықтың бір бөлігінде үзіліс болса да, өлшемдер сол үзіліс нүктесіне дейін алынуы мүмкін. BOTDA үшін болса, талшықтың кез келген жерінде үзіліс барлық жүйенің жұмысын тоқтатады. BOTDR жүйесінің басты кемшілігі — шашыраған Бриллюэн сигналының түскен жарықтан айтарлықтай төмен болуы, бұл сигнал-шум қатынасының төмендеуіне және деректерді жинау уақытын ұзартуға әкеледі [17, 18]. Фотонның табиғи өмір сүру ұзақтығына байланысты, Бриллюэн шашырау жүйесі 1 м кеңістіктік шешімді қамтамасыз етеді. Соңғы жылдары импульс алдын ала насос және талшықтың термиялық серпімділігі сияқты жаңа технологиялар әзірленді, олар термиялық сезімталдықты анықтайды, орталық толқын ұзындығы 1550 нм

болғанда FBG үшін кернеу мен температураға сезімталдық шамамен 1,2 пм/л және 13 пм/°C құрайды. FBG уақыт бойынша немесе толқын ұзындығы бойынша көпарналы жүйеге біріктірілуі мүмкін. Толқын ұзындығы бойынша мультиплексирленген FBG массивінің сезімталдығы лазердің жұмыс толқын ұзындығы диапазонымен шектеледі. Әр арнаның гратистері бір спектрді бөлісуі қажет, сондықтан гратистердің саны мен олардың динамикалық диапазоны арасында теңгерім орнатылуы тиіс.



1.8-сурет – Беткейге орнатылатын ұзын габаритті торлы FBG сенсоры

Уақыттық мультиплексирлеу (TDM) кең жолақты импульстік жарық көзін қолданады және гратистерді оларды детекторға қайтару уақыты бойынша ажыратады. Қайтару уақыттары детектордан арақашықтыққа байланысты болады, бұл талшықтағы орналасу немесе кешіктіру желілері арқылы анықталады. TDM жүйесінің негізгі шектеуі - сенсорлардың арасындағы қашықтықтың кем дегенде 1 м болуы, сонда қайтатын импульстер уақыт бойынша ажыратылады. FBG-ден айырмашылығы, LPG периодты гратистерге ие, олар талшықта тарайтын радиация толқын ұзындығынан айтарлықтай үлкен болады. Физикалық параметрлер, мысалы, кернеу мен температура, жарықтың спектрін талдау арқылы анықталады, бұл FBG үшін жарықтың шағылысқан спектрінен өзгеше [19].

2 Геотехникалық құрылымдардағы деформациялар мен кернеулерді өлшеуде талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану

2.1 Геотехникалық нысандардағы кернеу, температура және деформация өлшеу әдістері

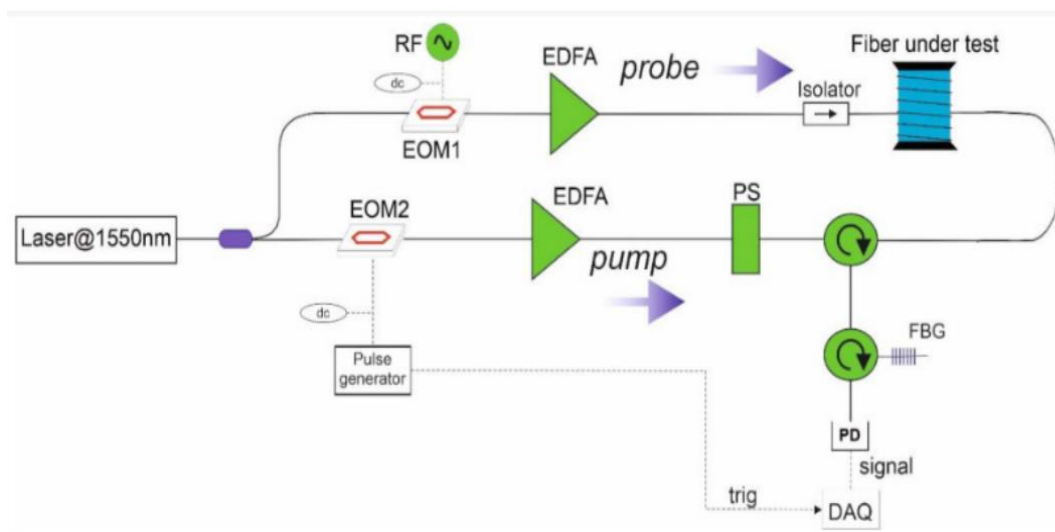
Геотекстиль материалдарына оптикалық талшықтарды біріктіру арқылы құрылымдардың күйін бақылау технологиясы қазіргі кезде кеңінен қолданылуда. Мұндай біріктірілген жүйе құрылыс барысында немесе пайдаланылу кезеңінде конструкцияларда туындайтын кернеулер мен деформацияларды анықтауға мүмкіндік береді. Геотекстиль мен сенсорлар бір құрылымда әрекет етіп, құрылымның бүкіл бойындағы өзгерістерді тіркеп, ұзақ мерзімді мониторинг жүргізуге қолайлы жағдай жасайды. Бұл тәсіл нақты уақыт режимінде деректер жинауға мүмкіндік беріп, құрылымдардың сенімділігін арттыруға және техникалық ақаулардың алдын алуға көмектеседі.

Бриллюэн оптикалық уақыт домендік рефлектометриясы (BOFDA) және Рейли шашырауы сияқты технологиялар талшық бойындағы физикалық параметрлерді жоғары дәлдікпен бақылауға мүмкіндік береді. BOFDA әдісі оптикалық талшық арқылы жіберілетін жарықтың шашырау сипаттарын талдау арқылы температура мен деформацияны қашықтықтан өлшейді. Ал Рейли шашырауы өте сезімтал болғандықтан, ол құрылымдағы өте ұсақ өзгерістерді тіркеуге мүмкіндік береді. Бұл әдістер құрылым бойындағы өзгерістерді кеңістіктік тұрғыдан толық сипаттауға мүмкіндік беріп, ақауларды ерте анықтауға жағдай жасайды.

Оптикалық талшықты датчиктер геотехникалық құрылымдардың сенімділігін бағалауда маңызды құрал ретінде танылады. Олар конструкциялардың жылжуын, жарықтардың пайда болуын, шөгуін немесе бұзылуын нақты тіркей алады. Мұндай датчиктер автоматты түрде ұзақ мерзімді деректер жинауға мүмкіндік береді және адам араласуынсыз жұмыс істей алады. Бұл технология құрылымның қауіпсіздігін қамтамасыз етіп қана қоймай, апат қаупін азайтуға және техникалық қызмет көрсету мерзімін дұрыс жоспарлауға көмектеседі. Әсіресе, сейсмикалық белсенді аймақтарда немесе әлсіз топырақ қабаттарында бұл бақылау әдістерінің маңызы зор [20].

Плотиналар мен дамбалардың жай-күйін бағалау үшін ішкі қысым маңызды параметр болып табылады. Қысым әсерінен диафрагманың ығысуын интерферометр арқылы өлшеуге болады, себебі бұл құрылғының сезімталдығы өте жоғары. EFPI (Эталонды талшықты интерферометр) 1 микрон дәлдікпен ығысуды анықтай алады, сондықтан оның негізінде көптеген қысым датчиктері жасалған. Дегенмен, дәстүрлі конфигурация негізінде EFPI ұзақ мерзімді статикалық өлшеулер үшін қолайлы болмауы мүмкін. Қысымды үздіксіз өлшеу үшін қос-EFPI қысым датчигі жасалды. Бұл құрылғыда серпімді элемент сәл ғана сығылған ауаның әсерінен белгілі бір эталонды қалыпқа дейін деформацияланады. EFPI дәл осы қалыпты тіркеп, өзін-өзі калибрлеу процедурасын іске қосады. Диафрагма ығысуы - бұл эталонды нүкте мен ауа

берілгенге дейінгі бастапқы қалпын салыстыру арқылы анықталады. Польшадағы Белхатов көмір шахтасында соңғы уақытта осындай қос-EFPI датчиктері орнатылып, су мен топырақ қысымын ұзақ мерзімді бақылау жүргізіліп жатыр. Плотиналар мен дамбалар жағдайында бұл жүйе өте тиімді.



2.1-сурет – (BOTDA) Brillouin оптикалық уақыт доменін талдау өлшемдері үшін эксперименттік орнату. (ЭОМ) электрооптикалық модулятор; (PS) поляризация қосқышы; (EDFA) эрбиум қосылған талшықты күшейткіш; (ПД) фотодетектор; (FBG) талшықты Брегг торы; (DAQ) деректерді алу.

Жаңа салынған немесе пайдаланудағы құрылымдардағы ірі бетон қадаларының құрылымдық тұтастығы мен жүк көтергіштік қабілетін бағалау үшін талшықты-оптикалық сенсорлар жиі қолданылады. Бұл сенсорлар, әдетте, қаданың қолжетімді бөліктеріне, мысалы, қада басына орнатылады. Қадаға механикалық соққы берілгенде, пайда болған толқындар құрылым бойымен таралады, ал сенсорлар осы толқындарды қабылдап, бетон ішіндегі акустикалық эмиссия (АЕ) сигналдарын тіркейді. АЕ сигналдарын талдау арқылы қаданың ішкі күйі, ақаулардың болуы және жүктеме астындағы құрылымның мінез-құлқы туралы маңызды ақпарат алуға болады [21].

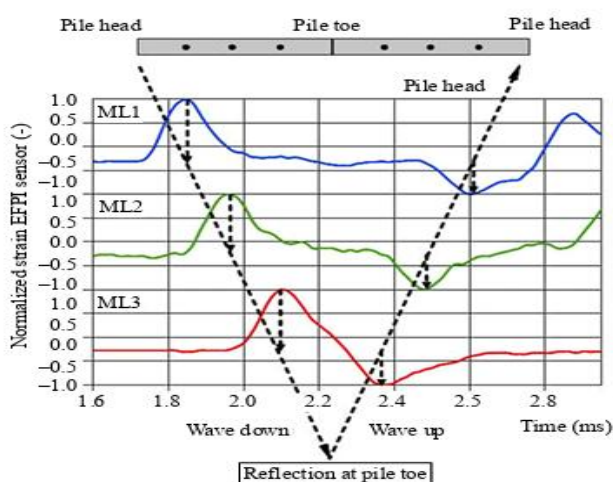
Толқындардың таралуы бірөлшемді модельдер арқылы қарастырылады, бұл әдіс қаданың жүк көтергіштігін және оның жалпы техникалық жағдайын жанама түрде бағалауға мүмкіндік береді. Алайда, дәстүрлі әдістермен қада басынан ғана алынатын деректер кей жағдайларда жеткіліксіз болуы мүмкін. Осы себепті зертханалық жағдайда сенсорлармен жабдықталған арнайы құрастырмалы қадалар жасалып, бетондағы ақаулар мен соққы толқындарының ұзындығына сезімталдық зерттеледі.

Тәжірибе нәтижелері Fabry-Perot типті оптикалық сенсорлардың сенсорлық корпусының ішкі бетіне орнатылуы олардың тиімділігін арттыратынын көрсетті. Бұл тәсіл бетон конструкциясындағы жергілікті ақауларды ерте кезеңде анықтауға және қаданың жұмыс істеу қабілетін нақты бағалауға мүмкіндік береді.

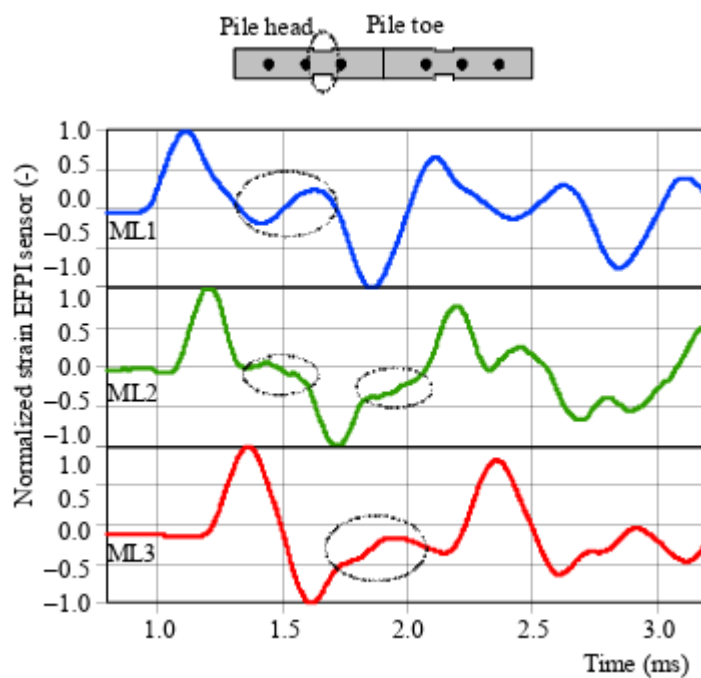
Құрастырылған үлгілі қадалар датчиктермен жабдықталған және сынақ кезінде жоғары соққы энергиясына ұшырайтын әзірленген бетон ендірілген датчиктердің сәйкестігін дәлелдеу үшін зертханада сыналған. Арнайы сенсорлық корпус әзірленді, оған әртүрлі сезгіш элементтер бекітіледі. Талшықты-оптикалық акустикалық эмиссия сенсорлары арнайы құралдың көмегімен сенсор корпусының ішкі бетіне бекітіледі. Салыстыру мақсатында акселерометр сенсорлары сенсор корпусының ішіне орнатылған; қарсылық тензометрлер (RSG) корпусының сыртқы бетіне бекітіледі. Бұл екі шағын масштабты қадалар динамикалық төмен деформациялық сынақтар, жоғары деформация және статикалық жүктеме сынақтары арқылы зерттелді. Біріктірілген сенсорлардың барлық сигналдық жауаптары жазылды және аспаптардың жалпы әдістерінен алынған сигналдармен салыстырылды [22].

Төменгі суретте ұзындығы шамамен 30 см болатын жасанды геометриялық ақау нүктелі шеңберлер арқылы белгіленген. Қада басынан 12-нүктедегі сенсорға дейінгі қосымша толқындық сигналдың жету уақыты айырмасын талдау арқылы осы ақаудың ұзындығы есептелді. Есептеулер нәтижесінде ML1 деңгейі бойынша - 29,6 см, ал ML3 деңгейі бойынша - 30,3 см көрсеткіштері алынды, бұл нақты енгізілген ақау ұзындығымен (30 см) жоғары дәлдікте сәйкестенеді [23].

ML2 деңгейіндегі сенсор ақау орнына тым жақын орналасуына байланысты, шағылған толқындардың интерференциясы мен соққы толқынының ұзындығына байланысты айқын қайталама шыңдар көрінбейді. Зертханалық сынақтар Fabry-Perot сенсорларын сенсорлық модульдің ішкі бетіне орнату тәсілінің тиімділігі мен нақты өлшеу жүргізуге жарамдылығын растады.

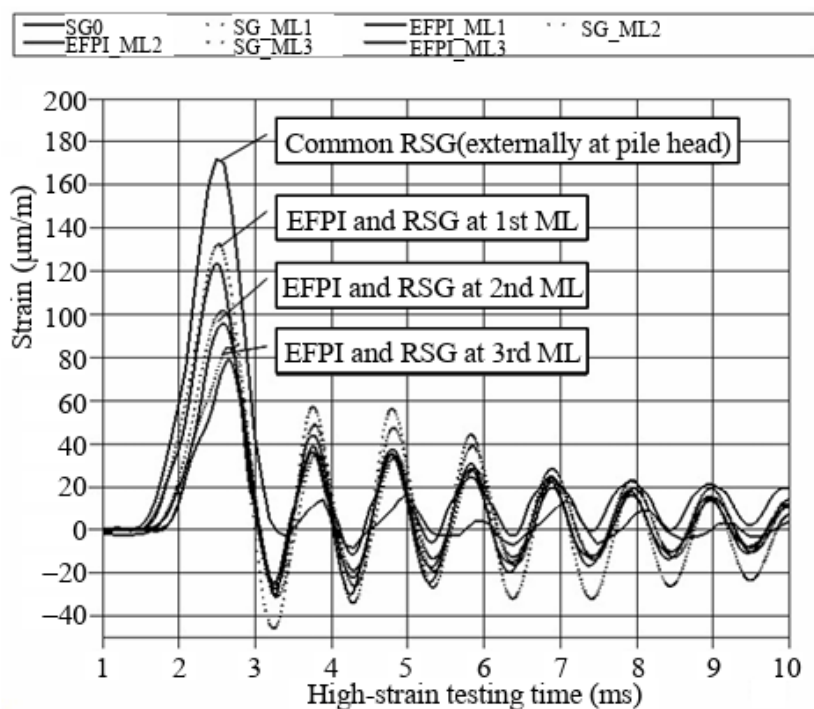


2.2-сурет – Төмен кернеулі тұтастықты сынау кезінде EFPI датчиктерінің уақыт өте келе бір қададан жетілмегендіксіз (жоғарыда), ал екіншісінде жетілмегендікпен (төменде) деформацияға реакциясы; соққы диаметрі 40 мм болат шармен (құлау биіктігі: 60 см) пайда болды.



2.3-сурет – Төмен кернеулі тұтастықты сынау кезінде EFPI датчиктерінің деформацияға реакциясы

Жоғары деформациялық қадаларды сынауға арналған барлық қолданылатын тензометрлердің (RSG және EFPI) деформация нәтижелері 2.4-суретте көрсетілген.



2.4-сурет – Жоғары деформацияны сынау кезінде өлшенген деформациялар

EFPI сенсорларынан алынған деформация қарқындылығының өлшеу деңгейлерінен келесі деңгейге өткен сайын айқын төмендеуі байқалады. Бұл құбылыс үйкеліс күштерінің әсерінен туындайды. Сонымен қатар, бұл деформацияның төмендеуі қада бетінде және табанында толқын энергиясының демпфирленуінен болатын жоғалтулармен де байланысты.

Екінші жағынан, бірдей деңгейлерде орналасқан Fabry-Perot типті кірістірілген сенсорлар (EFPI_ML1, 2, 3) мен тензорезистивті датчиктер (SG_ML1, 2, 3) арасындағы ішкі кернеу көрсеткіштерін салыстыру нәтижесінде өлшеу жүйелері арасындағы айырмашылық шамамен 5% екені анықталды.

Бетон ішіне орнатылған бұл деформация датчигі негізінен акустикалық эмиссия сигналдарын тіркеуге арналғанымен, сынақ үлгілері ретінде алынған екі қадада да статикалық жүктеме сынақтары жүргізілді. Жүктеме үш циклмен беріліп, ең жоғарғы жүктеме 110 кН-ды құрады. Үшінші циклден кейін қада басының тұрақты шөгуі 50 мм-ге жетті.

Сенсорлық жүйелерді салыстыру жақсы сәйкестік көрсетеді: EFPI және тензорезистивті сенсорлар арқылы алынған өлшеу нәтижелері 5%-дан 10%-ға дейінгі диапазонда өзгешеленеді. Деформация қисықтарының пішінін салыстыра отырып, бетон массасы жүктемені сенсор корпусына тиімді түрде жеткізетіні туралы қорытынды жасауға болады [24].

EFPI сенсорлары арқылы алынған мәліметтерге сүйене отырып, қада көтергіштігін дәстүрлі әдістердегідей, мысалы, кіріктірілген акселерометрлерді қолдану арқылы жасалатын тәсілмен есептеуге болады. Сонымен қатар, өлшеулер бірнеше нүктеде жүргізілгендіктен, қада көтергіштігі туралы неғұрлым нақты ақпарат алуға мүмкіндік туады. Осылайша, көтергіштікті есептеуге қажетті әдеттегі болжамдар саны едәуір қысқарады.

2.2 Талшықты-оптикалық датчиктердің геотехникалық құрылымдардағы жұмыс принципі

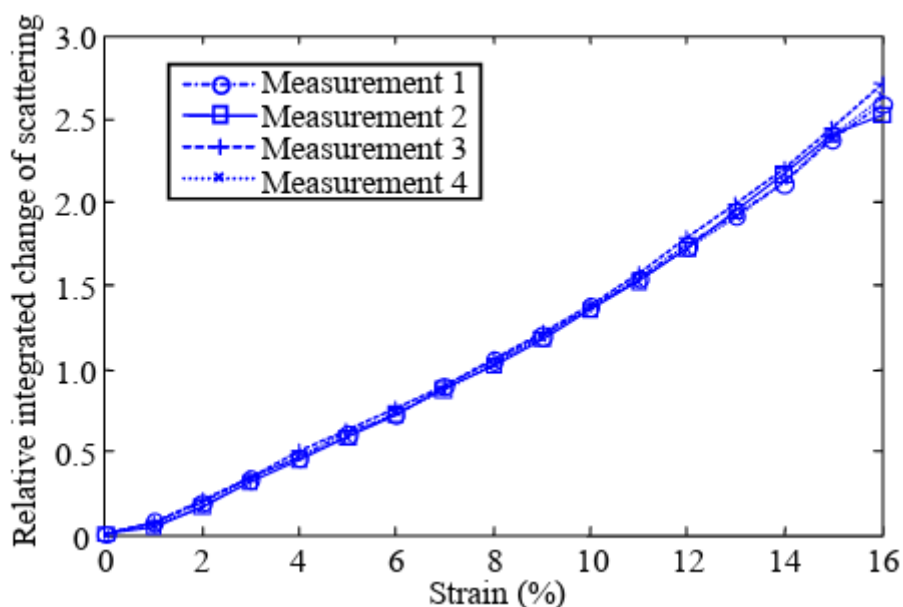
Геотехникалық құрылымдарда орын алатын қауіпті деформациялар - мысалы, эрозия, еңіс бөлігінің опырылуы, толқын соққысы немесе инженерлік желілерді орнату - топырақ массасының ығысуына алып келеді. Мұндай жағдайда орын ауыстыру күштері оптикалық талшық арқылы кернеу түрінде қабылданады. Бұл кернеулерді жоғары сезімталдықпен тіркеу үшін таралған талшықты-оптикалық деформация датчиктері қолданылады.

Сенсорлық қабатпен қапталған оптикалық талшықтарды геосинтетикалық материалдармен біріктірудің техникалық мүмкіндіктері бірнеше далалық сынақтарда тиімділігін дәлелдеген. Сол сынақтардың бірі ретінде Польшадағы Солина қаласында орналасқан гравитациялық бөгетке орнатылған сенсорлық геотекстиль үлгісін атауға болады. Бұл құрылғы талшық бойымен деформацияны нақты тіркеуге мүмкіндік береді және геотехникалық құрылымдардың сенімді мониторингіне жол ашады.

Бақылау жүйесінің сенімді жұмыс істеуі үшін деформацияға қатысты

ақпаратты полимерлік оптикалық талшыққа дәл әрі жоғалтусыз жеткізу маңызды. Осы мақсатта сезімталдық қасиеттерін сақтай отырып, полимерлі талшықты-оптикалық датчиктерді геосинтетикалық материалдармен тиімді интеграциялау әдістері әзірленген [25].

Сырғыма, шөгу немесе топырақтың тұрақсыз қозғалысы секілді қауіпті деформациялар жиі кездесетін геотехникалық нысандарға - мысалы, еңістер, теміржол үйінділері мен топырақ массалары - бөгеттерге қарағанда шағын көлемді аумақтар тән. Мұндай құрылымдардағы кернеу мен деформацияны тиімді бақылау үшін $\geq 1\%$ деформацияны өлшеуге қабілетті сенсорлық жүйелер қажет. Осы ретте полимерлік оптикалық талшықтардың (POF) бірқатар маңызды артықшылықтары бар: олар 40%-ға дейінгі деформацияларды жарық өткізу қабілетіне айтарлықтай әсер етпестен өлшей алады, механикалық тұрғыдан берік, монтаждауға ыңғайлы және құны жағынан тиімді.



2.5-сурет – Полимерлік оптикалық талшықтың бойындағы әртүрлі орындарда жүргізілген төрт түрлі сынақ сериясының нәтижесінде алынған кернеу өлшемдері

Қазіргі кезде полимерлік оптикалық талшықтардың тиімді ұзындығы шамамен 100 метрден аспайды. Аумағы шектеулі геотехникалық құрылымдарда қолдану мақсатында мұндай талшықтар тоқыма емес геотекстильге бойлық жіппен тоқу (warp-knitting) әдісі арқылы енгізіліп, «ақылды геотекстильдер» жасалуда. Алынған құрылым дренаждық жүйе ретінде немесе сенсорлық элементтерді тасымалдаушы лента түрінде қолданылады.

Арнайы зертханалық қондырғы жасалып, осы материалдарға нақты деформациялық жүктеме енгізу мүмкіндігі қамтамасыз етілді. Бұл құрылғы арқылы оптикалық талшыққа бойлай әртүрлі кернеу үлестірімін беру үшін оны белгілі бір кернеумен катушкаға орау әдісі қолданылады. Нәтижесінде, 16%-ға

дейінгі деформация кезінде шашыраған жарық қарқындылығының біртіндеп артқаны байқалды. 40%-ға жуық кернеуде бұл бейсызықтық күшейе түсіп, ал 40%-дан жоғары мәндерде талшықтың полиэтилен қабықшасының бұзылуы салдарынан жарықтың сөнуі орын алған.

Сондай-ақ, ұзақ уақыт бойы тұрақты кернеу түскен жағдайда шашыраған жарық деңгейінің төмендеуі тіркелді. Бұл өзгерістің тұрақты шамаға ұмтылатын-ұмтылмайтыны қосымша зерттеулерді қажет етеді. Бұған қоса, 100 метрден артық ұзындықтағы сенсорлық жүйелер үшін перфторланған полимерлік талшықтарды қолдану мүмкіндіктері көзінде қарастырылған.

Темірбетонды құрылымдар, мысалы, кәріз құбырлары, салқындату мұнаралары немесе тау ілмектерінде әртүрлі зиянды факторларға ұшырайды. Механикалық кернеуден бөлек, болаттың коррозиясы темірбетондағы ең маңызды зақымдану процесі болып табылады. Бұл адам мен қоршаған орта үшін қауіп төндіреді, себебі ақаулар алдын ала белгілерсіз пайда болуы мүмкін. Ылғалдылық пен хлорид иондарының концентрациясынан бөлек, рН мәні болатпен арматураланған және алдын ала кернеулі бетон конструкцияларын денсаулық мониторингі үшін маңызды химиялық параметр болып табылады. Темірбетон құрылымдарының ұзақ мерзімділігі олардың рН күйіне қатты байланысты, себебі бетон құрылымдарындағы бекітілген болаттар тек 9-дан жоғары рН мәндерінде ғана пассивті күйде болады. Осыған байланысты, 9-дан 13-ке дейінгі рН мәндерін 0,5 рН бірлігінің дәлдігімен ұзақ мерзімді бақылау коррозияның ықтимал жағдайларын ерте анықтау үшін маңызды болып табылады. Коммерциялық түрде қолжетімді құрылымға енгізілген сенсорлар бетон құрылымдарында болаттың коррозиясын ерте анықтауда кейде қажетті талаптарға толық сәйкес келмейді. Оптикалық талшық негізіндегі сенсорлар коррозияны бақылаудың болашағы зор технологиясы болып табылады, себебі олар кішкентай өлшемі, икемділігі, геометриялық көпжақтылығы, агрессивті және қауіпті ортаға төзімділігі, ылғалдың әсерінен сигналдың кедергісіздігі, *in-situ* және бұзбай өлшеу, сондай-ақ найзағай соққыларына төзімділігі сияқты көптеген тартымды мүмкіндіктер ұсынады. Осы артықшылықтарды пайдалану үшін бетонға орнатуға болатын ұзақ мерзімді тұрақты оптикалық талшықты рН сенсоры жасалды. Ең күрделі талаптар – бұл сенсордың 9-дан 13-ке дейінгі рН диапазонында, кем дегенде 25 жыл бойы күшті сілтілі жағдайларда тұрақтылығын қамтамасыз ету. Сенсор қатал ортада және қол жетпейтін жерлерде орнатылуы тиіс. Сонымен қатар, сенсорлық элементтің бетон матрицасымен тығыз байланысы қамтамасыз етілуі керек, өйткені рН өзгерістерін дәл анықтау үшін бұл өте маңызды. Ақырында, рН сенсорларының бағасы мүмкіндігінше төмен болуы тиіс, өйткені көп сенсорлы құрылымдарды жасау қажет [26,27]. Жаңа оптикалық талшықты рН сенсоры рН көрсеткішінен тұратын қабаттан жасалған, ол рН мәндеріне байланысты түсін өзгертіп, қатты субстрата бекітіледі. Көптеген зерттеулердің нәтижесінде, абсорбция әдісі ең сенімді өлшеу нәтижелерін беретін әдіс ретінде таңдалды. Индикатор концентрациясының фотодеградация немесе шайылудан туындаған тұрақсыздық мәселелерін, жарық көзі интенсивтілігінің ауытқуларын немесе

оптикалық талшықтардың бүгілулерін жеңу үшін екі түрлі толқын ұзындығындағы интенсивтіліктердің қатынасына негізделген қатынастық әдіс қолданылады (мысалы, интенсивтіліктің максимум нүктелерінде немесе изосбестикалық нүктеде). Мұндай интенсивтілік қатынасы сыртқы факторлардан өзгермейді. Өлшеу принципі және басқа да мәліметтер сілтемесінде сипатталған. 2.5-суретте сенсор басының дизайны көрсетілген.



2.6-сурет – pH сенсорының басының құрылымы

2.3 Талшықты-оптикалық датчиктерін қолданудың артықшылықтары мен шектеулері

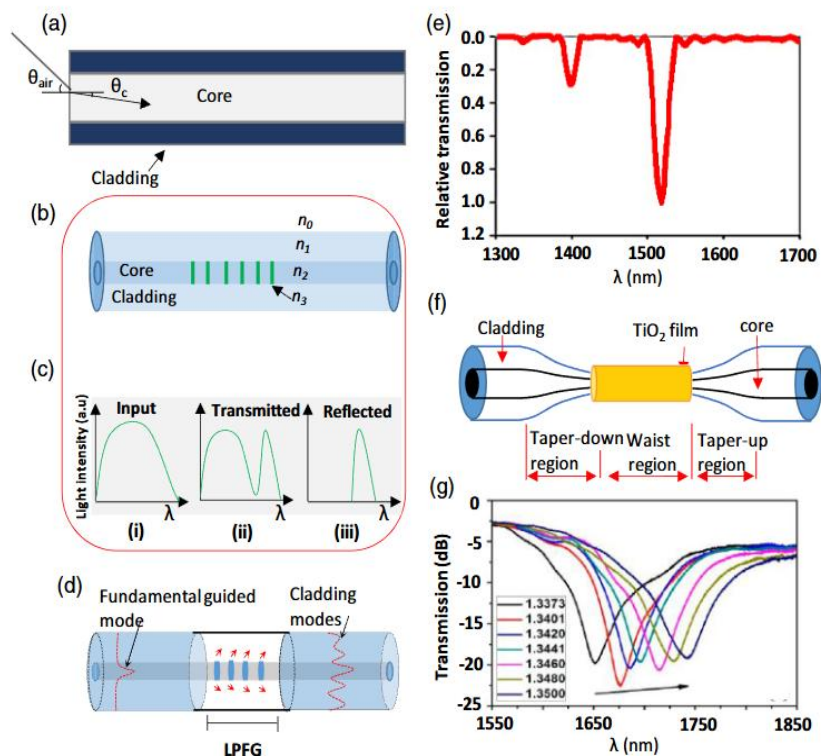
Талшықты-оптикалық технология алғашында деректерді беру және телекоммуникация салаларына бағытталғанымен, соңғы жылдары бұл технология негізінде жасалған сенсорлар қашық және қолайсыз жағдайларда жоғары сезімталдықпен жұмыс істей алатындығымен ерекшеленіп, кеңінен қолданыла бастады. Соңғы 30 жыл ішінде талшықты-оптикалық сенсорлардың қолдану аясы кеңейіп, олардың қолжетімділігі, шағын өлшемі, жеңіл салмағы және электромагниттік әсерлерге төзімділігі секілді артықшылықтары үлкен сұраныс тудырды. Бұл шолулық зерттеуде Брагг торлары, ұзын мерзімді торлар, интерферометрлер, беттік плазмондық резонанс, флуоресценция және жарықтың шашырауы негізіндегі сенсорлардың теориялық негіздері, жасалу әдістері, қолданылу салалары, артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады. Сонымен қатар, қоршаған ортаны бақылау, өнеркәсіптік және биомедициналық қолдану бағыттарында соңғы жылдары қол жеткізілген жетістіктер баяндалады. Бұл шолу талшықты-оптикалық сенсорлардың алдында тұрған негізгі техникалық қиындықтарды шешу жолдарын сипаттап, болашақтағы даму перспективаларын да назардан тыс қалдырмайды.

Оптикалық талшықтар - жарықты алыс қашықтыққа аз энергия жоғалту арқылы жеткізуге арналған заманауи технологиялық элементтер. Олардың

диаметрі көбінесе адам шашынан да жіңішке болады. Бұл талшықтар мөлдір өзек пен одан төмен сыну көрсеткішіне ие мөлдір қабықтан (қаптама) тұрады. Осындай құрылым жарықтың толық ішкі шағылу арқылы өзек ішінде таралуын қамтамасыз етеді.

Толқындық теорияға сәйкес, жарықтың барлық энергиясы тек өзек ішінде ғана емес, сонымен қатар эванесцентті толқындар түрінде қаптама бойымен де таралады. Егер жарық өзек пен қаптама шекарасына сыну бұрышынан үлкен бұрышпен түссе, ол толық шағылып, өзек ішінде сақталады. Ал егер бұл бұрыш критикалық мәннен төмен болса, жарық қаптамаға өтіп, таралуы тоқтатылады. Критикалық бұрыш - жарықтың толық ішкі шағылу режимінде таралуын қамтамасыз ететін ең төменгі бұрыш және ол өзек пен қаптама материалдарының сыну көрсеткіштерінің айырмасымен анықталады.

Қазіргі уақытта жарықтың таралу режимдеріне байланысты оптикалық талшықтар екі негізгі түрге бөлінеді: бірмодалы (single-mode) және көпмодалы (multimode) талшықтар. Бірмодалы талшықтар бір бағыттағы жарық толқынын өткізуге арналған және жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді. Ал көпмодалы талшықтар бірнеше бағыттағы жарық толқындарын бір мезгілде өткізе алады, бұл оларды қысқа қашықтықтағы бақылау жүйелерінде қолдануға ыңғайлы етеді [28].



2.7-сурет – Оптикалық талшықтардың негізгі түрлері мен олардың жарықпен әрекеттесу принциптері: а) кадамдық сыну көрсеткішіне ие талшық; б) Bragg торы бар талшық; в) Bragg торының жарық өткізгіштігі мен шағылу спектрі; д) ұзын периодты торлы талшық; е) ұзын периодты тордың спектрлік сипаттамалары; ф) сезімтал қабатпен қапталған конустық талшық; г) әртүрлі

сыну көрсеткіштері бар орталарда өлшенген өткізгіштік спектрі.

Әдетте, бір режимді талшықтардың негізгі диаметрі 8-10 мкм болады және қысқа инфрақызыл аймақта жұмыс істеуге арналған. Мультимодты талшықтар 50 мкм-ден жүздеген микрометрге дейінгі диапазондағы өзекшемен дайындалады және жоғары қуатты беру қажет болғанда пайдаланылады. оптикалық талшықтың сандық апертурасы (NA) - бұл талшық жарық сәулелерін қабылдай алатын, бағыттай алатын және шығара алатын бұрыштардың диапазонын анықтайтын сан. Қадамдық индекс талшығының NA мәні негізгі және қаптау материалдары арасындағы сыну көрсеткішінің айырмашылығына байланысты беріледі.

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} = n_{air} \sin \theta_{air} \quad (2.1)$$

Мұндағы n_{co} , n_{cl} және θ_{air} -сәйкесінше ядроның сыну көрсеткіштері, қаптау және жарық сәулелерінің түсу бұрышы. Бұрыш, θ_{air} , талшық өзегінің бойлық осіне қатысты өлшенеді (1а-Сурет). Тиісінше, NA талшыққа түсетін немесе одан шығатын жарық үшін қабылданатын түсу бұрыштарының диапазонын анықтайды [29]. Оптикалық талшықтың нормаланған жиілігі (V) талшықта таралуы мүмкін оптикалық режимдердің саны туралы ақпаратты қамтамасыз етеді және ОЛ NA және ядро диаметріне байланысты. Ол нормаланған жиілік арқылы беріледі.

3 Талшықты-оптикалық датчиктерді практикада қолдану

3.1 Геотехникалық құрылымдарға талшықты-оптикалық датчиктерді орнату әдістемесі

Талшықты-оптикалық датчиктер қазіргі заманғы геотехникалық құрылымдарды бақылаудың маңызды құралы болып табылады. Олар құрылымдардың физикалық және механикалық жағдайын бақылау және кез келген ауытқуларды уақытында анықтау үшін кеңінен қолданылады. Бұл датчиктер құрылымдардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету және қауіпсіздігін арттыру үшін ерекше маңызға ие. Талшықты-оптикалық датчиктердің геотехникалық құрылымдарға орнатылуы бірнеше кезеңдерден тұрады және әр кезең маңызды рөл атқарады.

Талшықты-оптикалық датчиктерді орнатпас бұрын, алдымен құрылымның физикалық және механикалық жағдайы мұқият зерттеледі. Құрылымның қалай жұмыс істейтіні, оның сыртқы әсерлерге қаншалықты төзімді екені анықталады. Әрбір құрылымның өзіндік ерекшеліктері бар: мысалы, көпірлер, туннельдер, немесе жоғары ғимараттар әртүрлі жүктемелерге және орташа температураға ұшырайды. Осы себептен, құрылымның ішкі бөліктері мен сыртқы қабаттарын толық тексеру маңызды. Бұл тексерулер құрылымның барлық элементтері, соның ішінде іргетас, тірек конструкциялар және қабырғалар тексеріледі, олардың күйі және жұмыс қабілеттілігі бағаланады.

Геотехникалық құрылымдарға орнатылатын талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері әртүрлі болуы мүмкін. Ең көп қолданылатын датчиктер - Fiber Bragg Grating (FBG) және Extrinsic Fabry-Perot Interferometer (EFPI) жүйелері. Бұл датчиктер температураның, қысымның, деформацияның және басқа да физикалық параметрлердің өзгерістерін өте дәл өлшейді. Мысалы, FBG датчиктері талшықтағы жарықтың толқын ұзындығының өзгеруін тіркейді, бұл құрылымдағы деформацияны дәл анықтауға мүмкіндік береді. Құрылымның әртүрлі бөліктеріне орнатылған датчиктер нақты уақытта құрылымның жай-күйін бақылайды және мониторинг жүйесіне деректерді үнемі жібереді.

Орнату процесі өте маңызды. Талшықты-оптикалық датчиктерді орнату кезінде олардың дұрыс орналасуын және максималды дәлдікті қамтамасыз ету қажет. Бұл датчиктер құрылымның барлық маңызды бөліктеріне орнатылуы керек: мысалы, көпірдің тірек бөліктеріне, туннельдердің қабырғаларына және т.б. Бұл датчиктер құрылымның әртүрлі бөліктерінде болуы тиіс, себебі әр түрлі бөліктер әртүрлі жүктемелер мен әсерлерге ұшырайды [30].

Талшықты-оптикалық датчиктерді орнатудың әдістемесі бірнеше факторларды ескере отырып таңдалады. Орнату процесі құрылымның түріне және оның орналасқан жеріне байланысты болады. Мысалы, көпірге орнату кезінде датчиктер әсіресе жүктемелердің көптігі мен ауытқуларды анықтау үшін маңызды болады, ал туннельдерде бұл датчиктер деформацияның немесе жарықшақтардың бар-жоғын бақылау үшін қолданылады.

Орнату кезінде кабельдерді орнату әдісі де маңызды. Талшықты-

оптикалық кабельдер өте жеңіл және икемді болғанымен, оларды орнату кезінде механикалық зақымданудан сақтау үшін қорғаныш қабаттарын қолдану қажет. Әрбір датчиктің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін арнайы жабдықтар мен орнату құралдары пайдаланылады, олар датчиктердің нақты және ұзақ мерзімді жұмысын қамтамасыз етеді.

Орнатылған датчиктер құрылымның жағдайын нақты уақыт режимінде бақылап отырады. Олар температура, қысым, деформация сияқты маңызды параметрлерді өлшеп, бұл ақпаратты орталық мониторинг жүйесіне жібереді. Деректердің жинақталуы және дұрыс талдануы құрылымның жағдайы туралы толық түсінік алуға мүмкіндік береді. Талшықты-оптикалық датчиктер деректерді жоғары дәлдікпен жинақтап, құрылымда орын алған кез келген өзгерісті уақытында анықтауға көмектеседі.

Мысалы, егер құрылымда қандай да бір жарықша немесе деформация пайда болса, датчиктер бұл өзгерісті дереу тіркеп, жүйеге хабарлайды. Бұл деректер негізінде құрылымның қауіпсіздігі туралы нақты ақпарат алынады. Құрылымда пайда болған ақауларға уақтылы жауап беру мүмкіндігі оны сақтандыру мен жөндеуге қажетті шараларды дер кезінде қабылдауға мүмкіндік береді.

Талшықты-оптикалық датчиктердің басты ерекшелігі - олар нақты уақыт режимінде құрылымның жағдайын бақылауға мүмкіндік береді. Бұл құрылымда болып жатқан кез келген өзгерісті дереу анықтап, оны жүйеге тіркеуге мүмкіндік береді. Мысалы, егер көпірде қандай да бір деформация орын алса, датчик жүйесі бұл өзгерісті тіркеп, оны тиісті мамандарға хабарлайды. Бұл құрылымның қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігіне үлкен әсер етеді, себебі бұл датчиктер құрылымның жұмысын үнемі бақылап отырады.

Талшықты-оптикалық датчиктер құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуде үлкен рөл атқарады. Олар құрылымдарда орын алған кез келген ауытқуларды анықтап, құрылымның қауіпсіздігіне төнген қауіптерді уақытында белгілейді. Бұл уақытында қабылданған шаралар құрылымның ұзақ уақыт бойы қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

Қорытындылай келе, талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылымдарға орнату әдістемесі құрылымдардың қауіпсіздігі мен сенімділігін арттыруда маңызды рөл атқарады. Бұл әдіс құрылымдардың кез келген ақауларын уақытында анықтап, оларды жөндеуге немесе күшейтуге мүмкіндік береді. Осылайша, талшықты-оптикалық датчиктер құрылымдардың жұмысын үнемі бақылап, олардың ұзақ уақыт бойы сенімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді [31, 32].

3.2 Датчиктерді модельдік зерттеу және олардың тиімділігін бағалау

EFPI құрылымына негізделген талшықты-оптикалық датчиктер - қазіргі таңда дәлдігі жоғары, сенімді және көп салалы бақылау жүйелерінде кеңінен қолданылатын заманауи сенсорлық технологиялардың бірі. Бұл құрылғылардың

жұмыс істеу принципі жарық толқындарының интерференция құбылысына негізделеді. Яғни, талшықтың ұшынан шағылған сәуле мен сыртқы шағылу беті арасындағы интерференциялық фаза айырмашылығын анықтау арқылы сыртқы ортаның әртүрлі физикалық параметрлерін (мысалы, деформация, қысым, температура және т.б.) өлшеуге мүмкіндік береді.

MATLAB бағдарламалық ортасында жасалған EFPI жүйесінің қарапайым моделі - бұл интерференциялық эффектілердің математикалық сипаттамасын ескере отырып, датчиктің сезімталдығы мен жұмыс тиімділігін модельдеу және талдау құралы ретінде пайдаланылады. Мұндай модельдер арқылы зерттеуші интерференциялық сигналдардың өзгеруін визуалды түрде бақылай алады, әртүрлі параметрлерге әсер ететін факторларды талдап, жүйені нақты жағдайларға бейімдей алады. Сонымен қатар, бұл модель талшықты-оптикалық датчиктердің телекоммуникация және геотехникалық бақылау салаларындағы қолдану тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

ЕЕPI сенсорының интерференциялық сигналының математикалық моделі

1. Параметрлер

λ - жарық толқынының ұзындығы (нанометрмен, nm);

$\lambda \in [1500, 1600]$ нм;

ΔL - қуыс ұзындығындағы деформация (мм);

$\Delta L \in [0,]$ мм;

L_0 -бастапқы қуыс ұзындығы (мм);

$L_0 = 20$ мм.

2. Физикалық негізі

ЕЕPI сенсорында интерференция екі беттен шағылған жарық толқындарының фазалық айырмасына байланысты пайда болады. Жарық қуыс ішінде екі жаққа барып қайтады, сондықтан оптикалық жол ұзындығы (OPD):

$$OPD = 2 \times L \quad (3.1)$$

$$L = L_0 + \Delta L \quad (3.2)$$

3. Фазалық айырма (φ)

$$\varphi = (4\pi(L_0 + \Delta L))/\lambda \quad (3.3)$$

4. Интерференциялық сигналдың интенсивтігі (I)

$$I(\lambda, \Delta L) = 1 + \cos(\varphi) \quad (3.4)$$

$$I(\lambda, \Delta L) = 1 + \cos((4\pi(L_0 + \Delta L))/\lambda) \quad (3.5)$$

ЕЕPI сигналының интерференциялық сигналы деформация мен жарық толқыны ұзындығына тәуелді. Сигнал осы формула бойынша есептеледі:

$$I(\lambda, \Delta L) = 1 + \cos((4\pi(L_0 + \Delta L))/\lambda) \quad (3.6)$$

мұндағы L_0 - бастапқы қуыс ұзындығы;

ΔL – деформация;

λ - толқын ұзындығы.

Бұл модель сенсор арқылы тіркелетін интерференциялық сигналды нақты сипаттауға мүмкіндік береді.

```
>> % EFPI сенсорының интерференциялық сигналын модельдеу

% Толқын ұзындығы (нм)
lambda = linspace(1500, 1600, 1000);

% Қуыстың деформациясы (мм)
deltaL = linspace(0, 1, 200);

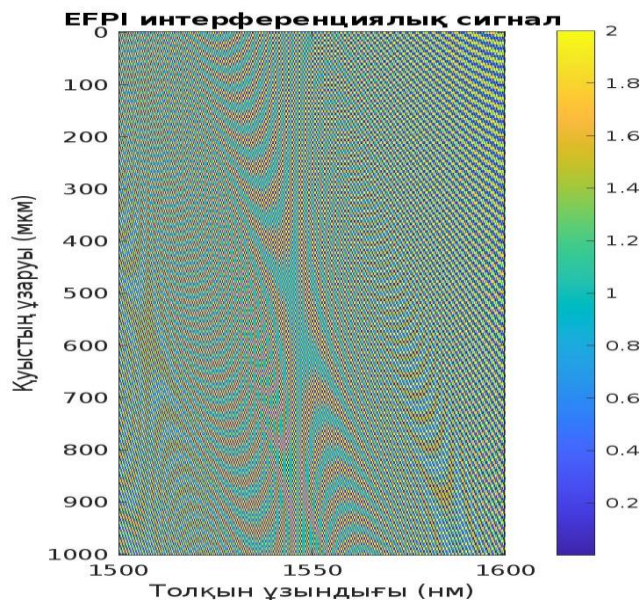
% Бастапқы қуыстың ұзындығы (мм)
L0 = 20;

% Интерференциялық сигнал матрицасы
I = zeros(length(deltaL), length(lambda));

% Интенсивтік сигналды есептеу
for i = 1:length(deltaL)
    L = L0 + deltaL(i); % Жалпы қуыстың ұзындығы
    phi = 4 * pi * L * 1e-3 ./ (lambda * 1e-9); % Фаза (радиан)
    I(i, :) = 1 + cos(phi); % Интенсивтік
end

% Нәтижені бейнелеу
figure;
imagesc(lambda, deltaL * 1e3, I); % deltaL мкм-ға ауыстырылды
xlabel('Толқын ұзындығы (нм)');
ylabel('Қуыстың ұзаруы (мкм)');
title('EFPI интерференциялық сигнал');
colorbar;
```

3.1-сурет – EFPI негізіндегі жүйенің қарапайым моделі



3.2-сурет – EFPI негізіндегі интерферометрлік сигнал

MATLAB бағдарламалық ортасында осы процестерді модельдеу - сенсорлардың нақты физикалық жағдайларға реакциясын сандық түрде сипаттауға мүмкіндік береді. Модельдеу арқылы сенсордың сезімталдық шегін,

өлшеу дәлдігін және жұмыс диапазонын алдын ала бағалауға болады. Бұл тәсіл ғылыми-зерттеу жұмыстарында, инженерлік жобалауда және нақты объектілерде сенсорларды қолданбас бұрын орындалады.

Модель негізінде енгізілген параметрлер (мысалы, жарық толқынының бастапқы ұзындығы, температуралық әсер немесе деформация) арқылы датчиктің шығу сигналының өзгерісі есептеледі. Алынған нәтижелер сенсорлардың тиімділігін бағалауға және практикалық қолдану үшін ең қолайлы конфигурацияны таңдауға септігін тигізеді.

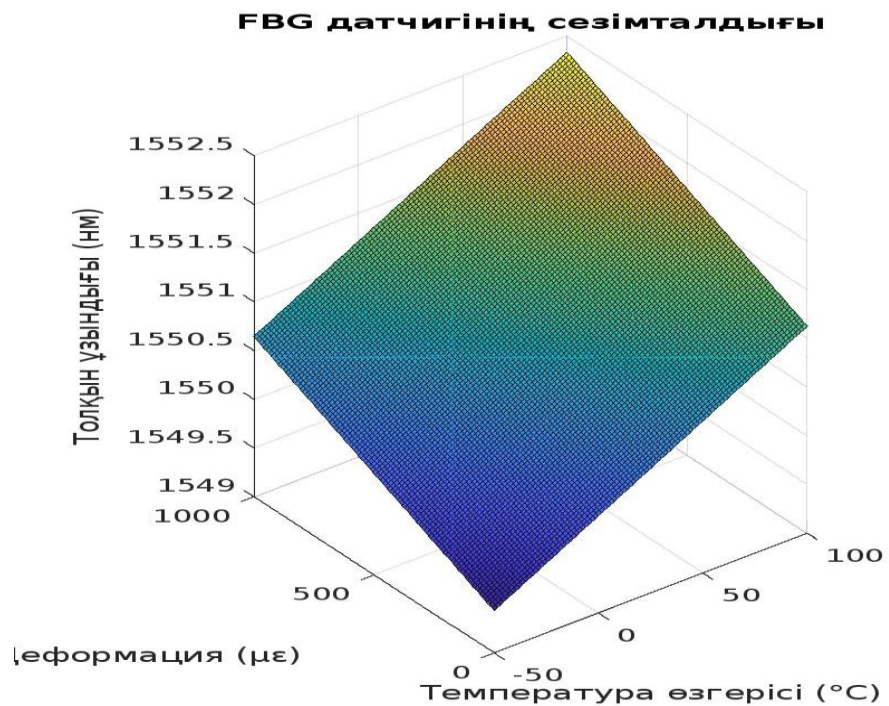
```
1 lambda_B0 = 1550; % Бастапқы Bragg толқын ұзындығы, нм
2 alpha = 0.55e-6; % Жылулық кеңею коэффициенті
3 ksi = 6.7e-6; % Сыну көрсеткішінің температуралық коэффициенті
4 pe = 0.22; % Фотоэластик коэффициент
5
6 T = linspace(-50, 100, 100); % Температура диапазоны, °C
7 eps = linspace(0, 1000, 100); % Деформация диапазоны, мк
8
9 [T_grid, Eps_grid] = meshgrid(T, eps);
10 delta_lambda = lambda_B0 * (alpha + ksi) .* T_grid + lambda_B0 * (1 -
11 pe) .* Eps_grid * 1e-6;
12 lambda_B = lambda_B0 + delta_lambda;
13 surf(T_grid, Eps_grid, lambda_B);
14 xlabel('Температура өзгерісі (°C)');
15 ylabel('Деформация (мк)');
16 zlabel('Толқын ұзындығы (нм)');
17 title('FBG датчигінің сезімталдығы');
18
```

3.3-сурет – FBG датчигінің матлабтағы моделі

MATLAB бағдарламасында FBG сенсорының жұмысын модельдеу арқылы оның физикалық параметрлерге (температура, кернеу және т.б.) реакциясын сандық тұрғыда зерттеуге болады. MATLAB көмегімен алынған модель сыртқы әсерлерге байланысты Bragg толқын ұзындығының қалай өзгеретінін көрсетіп береді. Бұл модель келесі қадамдарды қамтиды: жарық көзі параметрлерін орнату, FBG торының сипаттамаларын беру (тор периоды, ұзындығы), температуралық немесе кернеулік әсерлерді енгізу, нәтижесінде толқын ұзындығының ығысуын есептеу.

Мұндай модельдеу сенсордың сезімталдығын бағалауға, нақты жағдайлардағы жұмыс қабілеттілігін болжауға және сенсор жүйелерін оңтайландыруға көмектеседі.

Жалпы алғанда, MATLAB-тағы модельдеу FBG датчиктерінің практикалық қолдану аясын кеңейтуге және нақты геотехникалық немесе өндірістік объектілердегі сенсорлық жүйелерді жобалау мен тестілеуге үлкен мүмкіндік береді.



3.4-сурет – FBG датчигінің матлабтағы моделі

FBG құрылымы, әдетте, арнайы өңделген ультракүлгін сәуленің көмегімен оптикалық талшықтың ядросына тұрақты интервалдармен сыну көрсеткішінің өзгерісін енгізу арқылы қалыптастырылады. Бұл құрылым жарық сигналдарының нақты ұзындықтарын шағылыстырып, оларды детектор арқылы тіркеуге мүмкіндік береді.

FBG сенсорларының ең маңызды артықшылықтарының бірі - олардың жоғары сезімталдығы мен өлшеу дәлдігі. Олар сыртқы әсерлерге, атап айтқанда температуралық өзгерістерге және механикалық деформацияларға, өте сезімтал болып келеді. Аталған физикалық факторлар әсер еткен жағдайда, тор периоды және сыну көрсеткіші өзгеріске ұшырап, нәтижесінде Bragg толқын ұзындығы ығысады. Осы толқын ұзындығындағы өзгерісті дәл тіркеу арқылы сыртқы параметрлерді анықтауға болады.

Осы ерекшеліктерінің арқасында FBG сенсорлары заманауи инженерлік міндеттерді шешуде, соның ішінде геотехникалық құрылымдардың мониторингінде, инфрақұрылымдық объектілердің күйін бақылауда, авиация мен энергетика салаларында кеңінен қолданылуда. Олардың электромагниттік кедергілерге төзімділігі, шағын өлшемдері және бір талшық бойында бірнеше сенсорларды қатар орналастыру мүмкіндігі - бұл технологияны сенсорлық өлшеу жүйелерінде әмбебап құралға айналдырады. Талшықты-оптикалық сенсорлар Rayleigh шашырауын қолдану арқылы нақты уақыт режимінде сыртқы факторларды бақылауға мүмкіндік береді. Мысалы, температура мен деформацияны өлшеу кезінде талшықтағы шашырау интенсивтілігінің өзгеруін бақылап, қажет болған жағдайда физикалық жағдайды анықтауға болады.

Қолдану мысалдары: геотехникалық бақылау кезінде талшықты-оптикалық датчиктер топырақтың немесе құрылымның деформациясын өлшеу үшін қолданылады. Rayleigh шашырауының өзгеруі деформация деңгейінің индикаторы ретінде қолданылуы мүмкін. Температураны өлшеу, температураның өзгерісі де талшықтағы Rayleigh шашырауына әсер етеді, бұл әсіресе өнеркәсіптік бақылау жүйелерінде маңызды.

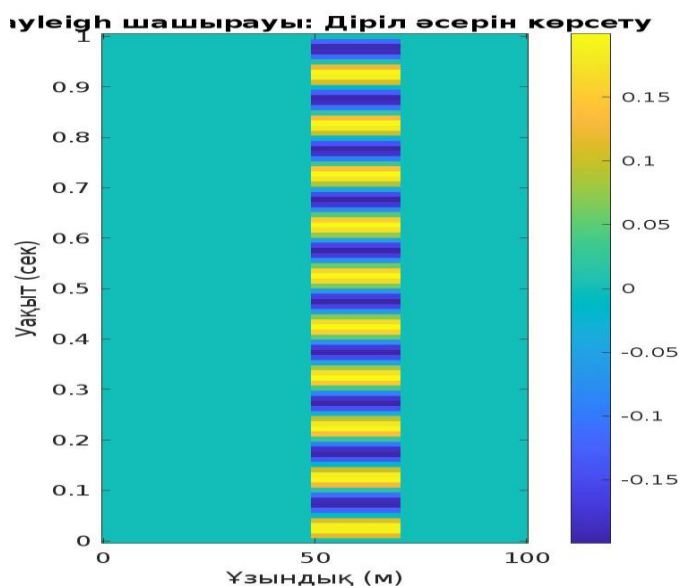
```
>> % Ұзындық пен уақыт осьтерін анықтаймыз
uzyn = linspace(0, 100, 100); % 0-ден 100 метрге дейін
uaqt = linspace(0, 1, 100); % 0-ден 1 секундқа дейін

% Top (grid) құрамыз
[X, Y] = meshgrid(uzyn, uaqt);

% Rayleigh шашырауы: 50-70 метр аралығында діріл эффектісі бар
Z = zeros(size(X)); % Бастапқы барлық нүктелер - тыныш
Z(:,50:70) = 0.2 * sin(20 * pi * Y(:,50:70)); % Діріл аймағы

% Графигті салу
figure;
imagesc(uzyn, uaqt, Z); % 2D кескін
colorbar; % Түс шкаласын қосу
xlabel('Ұзындық (м)');
ylabel('Уақыт (сек)');
title('Rayleigh шашырауы: Діріл әсерін көрсету');
set(gca, 'YDir', 'normal'); % Осьті төңкермеу (жоғарыдан төменге)
```

3.5-сурет – Rayleigh шашырауының жүйесі



3.6-сурет – Rayleigh шашырауы

MATLAB ортасында Rayleigh шашырауына негізделген модельдер жасау арқылы: талшықтың бойындағы деформация немесе температураның таралуын симуляциялауға; OTDR сигналдарын генерациялауға және өңдеуге, шашырау сигналдарының өзгерісін визуалды түрде көрсетуге болады.

```

>> % Параметрлер
kx = linspace(-pi, pi, 100); % x бағытындағы толқындық вектор
ky = linspace(-pi, pi, 100); % y бағытындағы толқындық вектор

% Топ жасау
[KX, KY] = meshgrid(kx, ky);

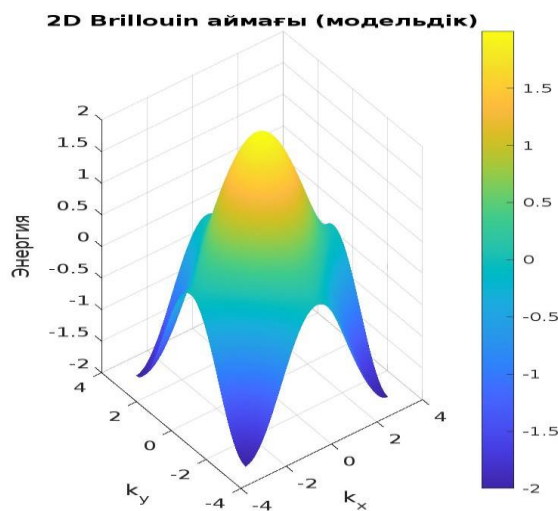
% Brillouin аймағы моделі: жай синусоидалық толқын
Z = cos(KX) + cos(KY); % Бұл - қарапайым екі өлшемді энергия дисперсиялық
бет

% График салу
figure;
surf(KX, KY, Z); % 3D бет
shading interp;
xlabel('k_x');
ylabel('k_y');
zlabel('Энергия');
title('2D Brillouin аймағы (модельдік)');
colorbar;

```

3.7-сурет – Brillouin аймағының 2D бейнесі

Бұл код 2D Brillouin аймағын визуализациялайды. Онда сіз k_x және k_y толқындық векторларының кеңістігінен тұратын энергияның таралуын көре аласыз. Қызметті жүргізу барысында әртүрлі мәндер үшін энергияның өзгеруі және осы өзгерістерге байланысты Brillouin аймағының шекаралары мен ішкі және сыртқы кеңістіктері арасындағы байланыс көрсетіледі.



3.8-сурет – Жұмыстың нәтижесі

2D Brillouin аймағы - бұл екі өлшемді материалдардың физикалық қасиеттерін зерттеу және болжау үшін маңызды құрал. Ол материалдардың құрылымдық және функционалдық ерекшеліктерін терең түсінуге мүмкіндік береді. Осы аймақтың зерттелуі жаңа материалдардың қасиеттерін бақылап, оларды тиімді қолдану үшін инженерлік шешімдер қабылдауға негіз болады. 2D Brillouin аймағының талдауы қазіргі заманғы нанотехнологияларда және материалтанудағы жаңа тәсілдерді дамытуда маңызды рөл атқарады, сонымен қатар әртүрлі инженерлік қолданбаларда пайдаланылатын материалдардың сапасын арттыруға ықпал етеді[33].

ҚОРЫТЫНДЫ

Дипломдық жұмыста талшықты-оптикалық датчиктердің теориялық және практикалық негіздері жан-жақты қарастырылды. Заманауи технологиялық талаптар мен ғылыми-зерттеу бағыттары шеңберінде бұл датчиктер ерекше өзектілікке ие болуда. Талшықты-оптикалық сенсорлар - геотехникалық құрылымдарды бақылау саласында дәлдік, сенімділік және ұзақмерзімділік тұрғысынан ерекше артықшылықтарға ие инновациялық құралдар ретінде танылуда.

Жұмыс барысында ең алдымен талшықты-оптикалық датчиктердің физикалық негіздері мен жұмыс принциптері, олардың жарық толқынының сипаттамаларына (амплитуда, фаза, жиілік, поляризация) әсер ету арқылы сыртқы ортаның физикалық параметрлерін анықтау қабілеті талданды. Датчиктердің құрылымы мен түрлерін сипаттай отырып, әрқайсысының қолдану саласына байланысты тиімді жақтары мен техникалық сипаттамаларына баса назар аударылды. Мысалы, интерферометриялық, рефлектометриялық, Bragg торлы және т.б. сенсор түрлері әртүрлі мақсатта және әртүрлі сезімталдықта жұмыс істейді.

Геотехникалық бақылау жүйелерінде қолданылатын талшықты-оптикалық датчиктердің ерекшеліктеріне жеке тоқталу арқылы, олардың күрделі ортада — жоғары ылғалдылық, қысым немесе температура жағдайында — сенімді жұмыс істеу мүмкіндіктері анықталды. Геотехникалық құрылымдардағы деформациялар мен кернеулерді анықтау үшін дәстүрлі әдістермен салыстырғанда талшықты-оптикалық сенсорлардың өлшеу дәлдігі әлдеқайда жоғары, әрі олар кең ауқымды деректерді үздіксіз режимде жинауға мүмкіндік береді.

Жоба барысында кернеу, температура және деформация сияқты физикалық параметрлерді өлшеу әдістері сараланып, осы параметрлерді геотехникалық құрылымдарда нақты қалай бақылайтыны көрсетілді. Датчиктердің геотехникалық құрылымдарда жұмыс істеу принциптері, жарық сигналындағы өзгерістерді тіркеу арқылы құрылым күйін бағалау тетіктері ғылыми түрде дәлелденді.

Сонымен қатар, талшықты-оптикалық сенсорларды қолданудың негізгі артықшылықтары мен шектеулері де қарастырылды. Атап айтқанда, электромагниттік кедергілерден толық қорғану, жоғары сезімталдық, ұзақ мерзімді қызмет етуі және кең диапозондағы ортада жұмыс істеу мүмкіндігі оларды ерекше етеді. Алайда, бастапқы орнату шығындарының жоғарылығы мен техникалық күрделілігі - бұл технологияны енгізудегі негізгі шектеулердің бірі ретінде көрсетілді.

Практикалық бөлімде талшықты-оптикалық датчиктердің нақты геотехникалық құрылымдарға орнату әдістемесі ұсынылып, орнату процесінің кезеңдері мен ережелері сипатталды. Модельдік зерттеу арқылы бұл датчиктердің тиімділігі мен сенімділігі бағаланып, алынған деректер негізінде нақты объектілерге орнату тәжірибесі мен нәтижелері талданды.

Жүргізілген зерттеулер мен тәжірибелер негізінде, талшықты-оптикалық сенсорлар геотехникалық нысандарды мониторингілеу, сейсмикалық қауіпсіздікті қамтамасыз ету, құрылымдық ақаулардың алдын алу және құрылыс нысандарын ұзақмерзімді бақылау жүйелерінде кең қолданыс табатыны анықталды. Тиімділік, дәлдік және технологиялық икемділік тұрғысынан бұл сенсорлар болашақта дәстүрлі бақылау әдістерін алмастыра алатын әмбебап құралға айналады.

Қорытындылай келе, дипломдық жұмыс нәтижелері талшықты-оптикалық датчиктердің геотехникалық бақылауда қолдану тиімділігін ғылыми және практикалық тұрғыдан дәлелдеді. Бұл технологияны отандық және халықаралық жобаларда қолдану еліміздің техникалық прогресіне, құрылыс қауіпсіздігін арттыруға және ғылыми зерттеу әлеуетін кеңейтуге айтарлықтай үлес қоса алады. Болашақта бұл бағытта жасалатын қосымша зерттеулер мен жетілдірулер арқылы сенсорлық жүйелерді жетілдіріп, автоматтандырылған бақылау жүйелерінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік бар.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Әбдірахманов, Қ.Ж., & Тұрсынов, А.М. (2024). Салмақ дефлектометр және талшықты-оптикалық датчик нәтижелеріне негізделген модельдеудің кері тәсілін тексеру. ҚазАДИ Вестник, №15, 2024, 45–52.
- 2 Жұмабеков, Н.Ә., & Сейітқұлов, Б.Т. (2023). Геотехникалық құрылымдарды бақылаудағы талшықты-оптикалық сенсорлардың рөлі. ҚазҰТЗУ ғылыми еңбектер жинағы, №2, 2023, 60–68.
- 3 Омаров, Д.Қ. (2022). Инфрақұрылымдық нысандардағы деформациялық процестерді бақылаудағы заманауи әдістер. «Құрылыс және геотехника» халықаралық конференция материалдары, Алматы, 2022, 112–118
- 4 Мұқашев, А.Б. (2021). Талшықты-оптикалық сенсорлар арқылы көпір құрылымдарының мониторингі, 2021, 25–31 беттер.
- 5 Сәрсенбаев, Е.Т. (2020). Геотехникалық құрылымдардың сенімділігін арттыруда оптикалық сенсорлардың қолданылуы, 2020, 40–47.
- 6 Сәтбаев университеті. Дәстүрлі проблемалардың инновациялық шешімдері: инженерия саласындағы зерттеулер жинағы. – Алматы, 2018. – Т. 2. – Б. 58–64.
- 7 Bao X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors //sensors. – 2012. – Т. 12. – №. 7. – С. 8601-8639..
- 8 Zillman J. The physical impact of disaster //Natural Disaster Management. Leicester: Tudor Rose Holdings Ltd. Leicestr. – 1999. – Т. 320.
- 9 Cruden D. A simple definition of a landslide //Bulletin of Engineering Geology & the Environment. – 1991. – Т. 43. – №. 1.
- 10 Casale R., Fantechi R., Flageollet J. C. (ed.). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. – European Commission, 1994.
- 11 Intrieri E. et al. Design and implementation of a landslide early warning system //Engineering Geology. – 2012. – Т. 147. – С. 124-136.
- 12 Hidayat R. et al. Development of a landslide early warning system in Indonesia //Geosciences. – 2019. – Т. 9. – №. 10. – С. 451.
- 13 Voight B. A relation to describe rate-dependent material failure //Science. – 1989. – Т. 243. – №. 4888. – С. 200-203.
- 14 Fukuzono T. Recent studies on time prediction of slope failure //Landslide News. – 1990. – Т. 4. – С. 9-12.
- 15 Wang B. et al. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring //Landslides. – 2009. – Т. 6. – С. 61-68.
- 16 Damiano E. et al. A laboratory study on the use of optical fibers for early detection of pre-failure slope movements in shallow granular soil deposits //Geotechnical Testing Journal. – 2017. – Т. 40. – №. 4. – С. 529-541.
- 17 Zhao M. et al. PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing technology and its application to the Baishuihe landslide //Frontiers in Earth Science. – 2021. – Т. 9. – С. 660918.

- 18 Elsherif M. et al. Optical fiber sensors: Working principle, applications, and limitations //Advanced Photonics Research. – 2022. – T. 3. – №. 11. – C. 2100371.
- 19 Kashyap R. Photosensitive optical fibers: Devices and applications //Optical Fiber Technology. – 1994. – T. 1. – №. 1. – C. 17-34.
- 20 Narayanaswamy R., Wolfbeis O. S. (ed.). Optical sensors: industrial environmental and diagnostic applications. – Springer Science & Business Media, 2003. – T. 1.
- 21 Ficocelli P. Fiber optic thermal monitoring systems for SAGD //PTAC Technology Information Session. – 2008.
- 22 Ghatak A. K., Thyagarajan K. An introduction to fiber optics. – Cambridge university press, 1998.
- 23 Castrellon-Urbe J. Optical fiber sensors: an overview. – London, UK: : IntechOpen, 2012. – C. 1-26.
- 24 Sabri N. et al. Fiber optic sensors: short review and applications //Recent trends in physics of material science and technology. – 2015. – C. 299-311.
- 25 Korotcenkov G. et al. Optical and fiber optic chemical sensors //Chemical sensors: comprehensive sensor technologies. – 2011. – T. 5. – C. 1-56.
- 26 Baldini F. et al. Continuous monitoring of gastric carbon dioxide with optical fibres //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2003. – T. 90. – №. 1-3. – C. 132-138.
- 27 Baldini F., Giannetti A. Optical chemical and biochemical sensors: new trends //Opto-Ireland 2005: Optical Sensing and Spectroscopy. – SPIE, 2005. – T. 5826. – C. 485-499.
- 28 Sabri N. et al. Fiber optic sensors: short review and applications //Recent trends in physics of material science and technology. – 2015. – C. 299-311.
- 29 Krohn D. Overview of fiber optic sensors //KMI's 26th annual Newport conference. – 2003.
- 30 Theodosiou A. et al. In-situ relative humidity sensing for ultra-high-performance concrete using polymer fiber Bragg gratings //IEEE Sensors Journal. – 2021. – T. 21. – №. 14. – C. 16086-16092.
- 31 Pabbiseti V. N. K., Madhuvarasu S. S. Hydrogel-coated fiber Bragg grating sensor for pH monitoring //Optical Engineering. – 2016. – T. 55. – №. 6. – C. 066112-066112.
- 32 Kishore P. V. N., Shankar M. S., Satyanarayana M. Detection of trace amounts of chromium (VI) using hydrogel coated Fiber Bragg grating //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2017. – T. 243. – C. 626-633.
- 33 Wang X. D., Wolfbeis O. S. Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2008–2012) //Analytical chemistry. – 2013. – T. 85. – №. 2. – C. 487-508.

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

дипломдық жұмыс

Амангелді Аружан Ескендірқызы

6B06201 - Телекоммуникация

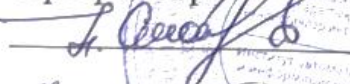
Тақырыбы: Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелерінде қолдану

Амангелді Аружан «Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйесінде қолдану» тақырыбындағы дипломдық жұмысы заманауи құрылыс саласындағы өзекті мәселелердің біріне арналған. Жұмыстың мақсаты – талшықты-оптикалық сенсорлардың, соның ішінде EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) типті датчиктердің геотехникалық құрылыстарды, әсіресе бөгеттерді бақылаудағы тиімділігін зерттеу және оларды нақты инженерлік нысандарда қолдану мүмкіндігін көрсетті.

Зерттеу барысында студент оптикалық сенсорлардың жұмыс принциптерін, олардың артықшылықтары мен ерекшеліктерін жан-жақты қарастырған. Сонымен қатар, нақты құрылымдық элементке орнату сценарийі ұсынылып, 3D моделдеу, математикалық модель құру және алынған нәтижелерді графиктік түрде талдау жұмыстың ғылыми тереңдігін арттырған.

Дипломдық жұмыс «93» деп бағаланды, ал студент Амангелді Аружан 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші
ЭтжҒТ каф. PhD докторы
профессор

 Н.К.Смайлов.

«28»

05 2025 ж.



СЫН - ПІКІР
дипломдық жұмыс

Амангелді Аружан Ескендірқызы

6B06201 - Телекоммуникация

Тақырыбы: **Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелерінде қолдану**

Орындалды:

- а) графикалық бөлімі 16 бет;
б) түсіндірме жазба 40 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Амангелді Аружанның дипломдық жұмысы талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелеріне арналған.

Студент өзінің дипломдық жұмысында талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық бақылау жүйелерінде қолдану мәселесін жан-жақты қарастырды. Жұмыс барысында датчиктердің техникалық сипаттамалары, түрлері, жұмыс істеу принциптері мен практикада қолданылу ерекшеліктері егжей-тегжейлі зерттелді. Сонымен қатар, дәстүрлі өлшеу құрылғыларымен салыстырғанда талшықты-оптикалық датчиктердің сезімталдығы жоғары, сыртқы факторларға төзімділігі мен ақпаратты дәл беру мүмкіндігі басым екені дәлелденді.

Жұмыстың маңызды артықшылықтарының бірі - датчиктердің жұмыс принципін MatLab бағдарламасы арқылы математикалық модельдеу. Бұл бөлімде студент талшықты-оптикалық датчиктің жұмысын сандық әдіспен сипаттап, модельдеу нәтижелерін талдау арқылы олардың тиімділігін нақты мысалдармен көрсетті. Бұл зерттеу жұмысқа ғылыми тереңдік пен практикалық мән берді.

Бұл дипломдық жұмыс жоғары оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғары дәрежеде жазылған.

Жұмыс бағасы

Дипломдық жұмыс 90 деп бағаланды, ал студент Амангелді Аружан Ескендірқызы 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензия беруші

Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті
PhD, зерттеуші профессор

Омаров Б. С. Омаров
« 28 » 05 2025 ж



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Амангелді Аружан Ескендірқызы

Тақырыбы: Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелерінде қолдану

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 6

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.9

Дәйексөз (35): 0.5

Әріптерді ауыстыру: 11

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 1

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-23

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Амангелді Аружан Ескендірқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелерінде қолдану

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 6

Коэффициент Подобия 2: 1.9

Микропробелы: 1

Знаки из других алфавитов: 11

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-23

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Амангелді Аружан Ескендірқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Талшықты-оптикалық датчиктерді геотехникалық құрылыстарды бақылау жүйелерінде қолдану

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 6

Коэффициент Подобия 2: 1.9

Микропробелы: 1

Знаки из других алфавитов: 11

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-23

Дата



Сұңғат Марқсұлы

проверяющий эксперт