

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

Әміржанов Баубек Талғатұлы

«Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B06201 – Телекоммуникация мамандығы

Алматы 2025 ж.

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

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТЖТІ кафедра меңгерушісі

Т.Ғ.К

Е.Таштай

2025 ж.



ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу»

6B06201 – Телекоммуникация мамандығы

Орындаған:

Б.Т. Әміржанов

Пікір беруші
PhD, зерттеуші профессор
Халықаралық ақпараттық
технологиялар университеті

Ғылыми жетекші
PhD докторы,
профессор

Б. С. Омаров

Н.К.Смайлов

« 28 » 05 2025 ж.

« 21 » 05 2025 ж.

Алматы 2025

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 мамандығы



Дипломдық жұмыс орындауға

ТАПСЫРМА

Білім алушы: Әміржанов Баубек Талғатұлы

Тақырыбы: «Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу».

Университет ректорының «29» қаңтар 2025 ж. №26-П/Ө бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» мамыр 2025 ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: 1. Талшықты-оптикалық сенсорлар. Талшықты-оптикалық сенсорлар классификациясы. Сыртқы әсерден жарық сәулесінің шағылысу коэффициентін өлшеу әдістемесі. 2. Талшықты-оптикалық сенсорларды жасау, жазу және өндеу әдістемесі. Талшықты-оптикалық сенсорларды құрылыс материалдарына енгізу әдістері. 3. MatLab және OptiSystem бағдарламалары бойынша талшықты-оптикалық сенсорлардың спектрін анализдеу.





Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі: а) Талшықты-оптикалық сенсорларды бетон, металл, сияқты әртүрлі құрылыс материалдарына енгізу әдістерін анықтау. б) Құрылыс материалдарының механикалық қасиеттерін бақылау үшін қолданылатын басқа сенсорлармен салыстыру. в) Талшықты-оптикалық сенсорлардың көмегімен алынған деректерді талдау және құрылыс материалдарының сипаттамаларын бағалау. г) Сенсорларды қолдану арқылы құрылыс материалдарының сапасын арттырудың ұзақ мерзімді әсерлерін зерделеу.

Сызбалық материалдар 16 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:




1. Bado, M.F.; Casas, J.R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. Sensors. 05.03.2021. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
2. Wu, T.; Liu, G.; Fu, S.; Xing, F. Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. 12.08.2020. <https://doi.org/10.3390/s20164517>
3. Alhussein, A.N.D.; Qaid, M.R.T.M.; Agliullin, T.; Valeev, B.; Morozov, O.; Sakhabutdinov, A. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies. 04.04.2025. <https://doi.org/10.3390/s25072289>
4. Souza, E.; Pinheiro, P.; Coutinho, F.; Dias, J.; Pilar, R.; Pontes, M.J.; Leal-Junior, A. Smart Concrete Using Optical Sensors Based on Bragg Gratings Embedded in a Cementitious Mixture: Cure Monitoring and Beam Test. Sensors. 14.12.2024. <https://doi.org/10.3390/s24247998>

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

| Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі | Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі | Ескерту |
|---|---|---|
| Талшықты-оптикалық сенсорларды бетон, металл, сияқты әртүрлі құрылыс материалдарына енгізу әдістерін анықтау | 07.02.2025 |  |
| Құрылыс материалдарының механикалық қасиеттерін бақылау үшін қолданылатын басқа сенсорлармен салыстыру | 24.03.2025 |  |
| Талшықты-оптикалық сенсорлардың көмегімен алынған деректерді талдау және құрылыс материалдарының сипаттамаларын бағалау | 20.04.2025 |  |
| Сенсорларды қолдану арқылы құрылыс материалдарының сапасын арттырудың ұзақ мерзімді әсерлерін зерделеу | 26.04.2025 |  |

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған

Қолтаңбалары

| Бөлімдер атауы | Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы) | Қол қойылған күні | Қолы |
|---|--|-------------------------|---|
| Диплом жұмысының тақырыбын талдау | Смайлов Н.К., PhD докторы, профессор | 21.05.2025 |  |
| Теориялық ақпарат | Смайлов Н.К., PhD докторы, профессор | 21.05.2025 |  |
| Норма бақылау | Досбаев Ж.М., ЭТЖҒТ каф.аға оқытушысы, PhD | 21.05.2025 |  |

Ғылыми жетекшісі



Смайлов Н.К.

Тапсырманы орындауға алған білім алушы



Әміржанов Б.Т.

Күні «21» мамыр 2025 ж.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеулер жүргізілді. Жұмыстың мақсаты – талшықты-оптикалық сенсорлардың әртүрлі түрлерін, олардың жұмыс принциптерін және құрылыс саласындағы объектілердің жағдайын бақылау үшін қолданылуын талдау

Зерттеу барысында құрылыс материалдарында талшықты-оптикалық сенсорларды қолданудың қазіргі технологиялары мен әдістеріне шолу жасалды. Сенсорларды әртүрлі құрылымдарға интеграциялау әдістемесі әзірленіп, прототиптермен тәжірибелер өткізілді. Зерттеу нәтижелері талшықты-оптикалық сенсорлардың қоршаған орта әсерлеріне жоғары дәлдік пен тұрақтылық танытатынын, сондай-ақ объектілердің күйін нақты уақыт режимінде ұзақ мерзімді бақылау мүмкіндігін көрсетеді.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена изучению влияния волоконно-оптических сенсоров на строительные материалы. Целью работы является анализ различных типов волоконно-оптических сенсоров, принципов их работы и применения для контроля состояния объектов в строительной отрасли.

В исследовании рассмотрены современные технологии и методы использования волоконно-оптических сенсоров в строительных материалах. Была разработана методология интеграции сенсоров в различные конструкции и проведены эксперименты с прототипами. Результаты исследований показывают, что волоконно-оптические сенсоры демонстрируют высокую точность и устойчивость к воздействиям окружающей среды, а также способность контролировать состояние объектов в режиме реального времени в течение длительного времени.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the study of the influence of fiber-optic sensors on building materials. The aim of the work is to analyze various types of fiber-optic sensors, their operating principles and application for monitoring the condition of objects in the construction industry.

The study considers modern technologies and methods for using fiber-optic sensors in building materials. A methodology for integrating sensors into various structures was developed and experiments with prototypes were conducted. The research results show that fiber-optic sensors demonstrate high accuracy and resistance to environmental influences, as well as the ability to monitor the condition of objects in real time for a long time.

МАЗМҰНЫ

| | |
|--|----|
| Кіріспе | 8 |
| 1 Құрылыс материалдарының жағдайын бақылаудағы талшықты-оптикалық сенсорлар | 9 |
| 1.1 Талшықты-оптикалық сенсорлар саласындағы соңғы жетістіктері | 9 |
| 1.2 Талшықты-оптикалық сенсорлардың классификациясы | 10 |
| 1.3 Металл-бетон конструкцияларында талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану туралы ғалымдардың пікірі | 18 |
| 2 Талшықты-оптикалық сенсорларды өндіру және енгізу әдістері | 23 |
| 2.1 Талшықты оптикалық сенсорлардың жасалуы және жазылуы | 23 |
| 2.2 Талшықты-оптикалық сенсорларды құрылыс материалдарына енгізу әдістері және оның әсері | 27 |
| 2.3 Қазіргі уақытта әлем бойынша қолданылуы | 33 |
| 3 Эксперименттік нәтижелер | 36 |
| 3.1 MatLab бағдарламасы бойынша ТОС-дың температурасына байланысты есептеулер | 36 |
| 3.2 MatLab бағдарламасы бойынша ТОС-дың деформациясына байланысты есептеулер | 38 |
| 3.3 OptiSystem бағдарламасы арқылы ТОС-ды компьютерлік модельдеу | 41 |
| Қорытынды | 46 |
| Пайдаланылған әдебиеттер тізімі | 47 |

КІРІСПЕ

Заманауи құрылыста ғимараттар мен құрылыстардың жағдайын бақылауға ерекше назар аударылады. Құрылыс конструкцияларының беріктігі мен сенімділігі көбінесе ықтимал ақауларды, жүктемелерді және материалдар құрылымындағы өзгерістерді уақтылы анықтауға байланысты. Осыған байланысты талшықты-оптикалық сенсорлар (ТОС) сияқты инновациялық технологияларды қолдану өзекті бола түсуде.

Талшықты-оптикалық сенсорлар - құрылыс материалдарының деформациясы, температурасы, қысымы және басқа сипаттамалары сияқты әртүрлі физикалық параметрлерді өлшеу үшін талшықты-оптикалық технологияны қолданатын құрылғылар. Олардың басты артықшылығы - жоғары сезімталдық, беріктік, электромагниттік үйлесімділік және агрессивті ортада жұмыс істеу мүмкіндігі. Дәстүрлі сенсорлардан айырмашылығы, ТОС нақты уақыт режимінде құрылымдардың жағдайын дәлірек бақылауды қамтамасыз етеді, бұл төтенше жағдайлардың ықтималдығын айтарлықтай төмендетеді және ғимараттардың қызмет ету мерзімін ұзартады.

Құрылыста талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану кең ауқымды міндеттерді қамтиды: көпірлер мен көпқабатты үйлерді бақылаудан бастап туннельдердің, бөгеттердің және тарихи ескерткіштердің жағдайын бақылауға дейін. ТОС өзгерістерді тіркеп қана қоймай, ақаулардың дамуын болжауға мүмкіндік беретінін атап өту маңызды, бұл алдын алу шараларын уақтылы қабылдауды жеңілдетеді.

Бұл жұмыс талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеуге арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты - ТОС пайдалану материалдардың сипаттамаларына, олардың беріктігіне, беріктігіне және сыртқы факторларға төзімділігіне қалай әсер ететінін анықтау. Осы мақсатқа жету үшін жұмыста ТОС-мен жабдықтау жүйелерінің жұмыс істеу принциптері, олардың жіктелуі, құрылыс конструкцияларына енгізу әдістері қарастырылып, құрылыс индустриясында осы технологияларды сәтті қолдану мысалдары талданады.

Бұл тақырыптың өзектілігі құрылыс алаңдарының жағдайын бақылаудың тиімді әдістеріне қажеттіліктің артуына байланысты. Инфрақұрылымға қысымның күшеюі және қаланың қарқынды дамуы жағдайында заманауи мониторинг жүйелеріне қажеттілік барған сайын айқын бола түсуде. Талшықты-оптикалық сенсорлар өзінің бірегей қасиеттерімен құрылыс құрылымдарын бақылау технологияларын дамытудың перспективалық бағыты болып табылады.

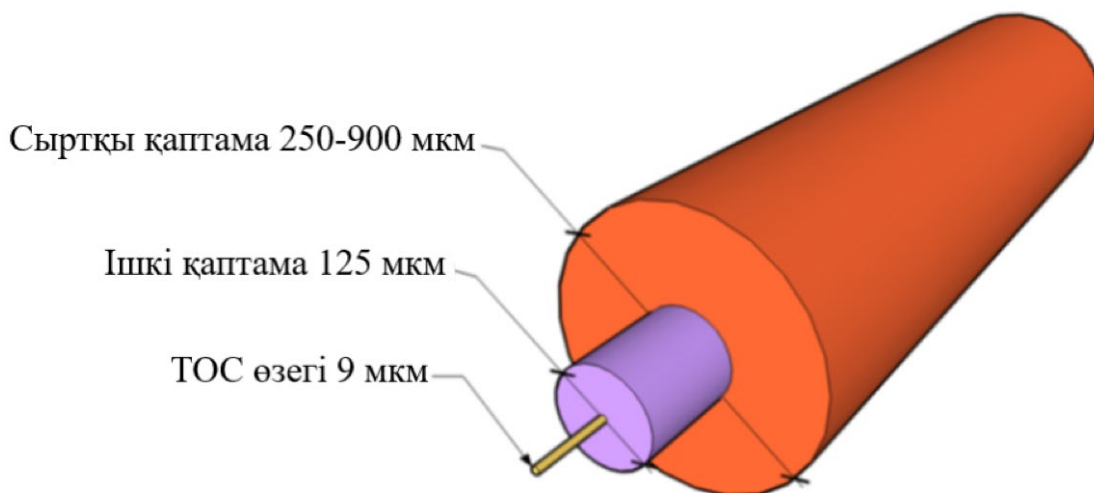
Осылайша, талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеудің ғылыми және практикалық маңызы бар. Жұмыстың нәтижелері ғимараттар мен құрылыстардың сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыруға ұмтылатын инженерлер, дизайнерлер және құрылыс мамандары үшін пайдалы болуы мүмкін. Жұмыстың келесі бөлімдерінде талшықты-оптикалық сенсорлардың сипаттамаларына және олардың құрылыс материалдарына әсері егжей-тегжейлі талдау жүргізіледі, бұл оларды тиімді пайдалану үшін негізделген қорытындылар мен ұсыныстарды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

1 Құрылыс материалдарының жағдайын бақылаудағы талшықты-оптикалық сенсорлар

1.1 Талшықты-оптикалық сенсорлар саласындағы соңғы жетістіктері

Талшықты-оптикалық сенсорлар (ТОС) инфрақұрылымның тұтастығын бағалау үшін дәл және сенімді деректерді жинауды қамтамасыз етеді, бұл азаматтық құрылыстағы құрылымдық денсаулық мониторингінде революцияға әкелді. Бұл сенсорлар талшықты-оптикалық технологияның жетістіктерінің арқасында соңғы жылдары көпірлер, туннельдер және темір жолдар сияқты маңызды құрылымдарды бақылаудың маңызды құралына айналды.

Талшықты-оптикалық сенсорлық жүйе сезімтал элемент қызметін атқаратын түрлендіргіштен, өлшенетін шама туралы деректерді жіберетін байланыс арнасынан және энергиямен қамтамасыз етуге және сигналды өңдеуге жауапты ішкі жүйеден тұрады. ТОС қаптамасы бірнеше қабаттан тұрады, яғни: талшық өзегінен, ішкі және сыртқы қаптамадан тұрады. ТОС ішкі құрылысы төмендегі, 1.1 - суретте көрсетілген [1]:



1.1-сурет – ТОС ішкі құрылысының 3D иллюстрациясы

Бір талшыққа бірнеше сенсорларды орналастыру арқылы бөлінген сенсорлық желілер кернеу, жарықтар және коррозия сияқты локализацияланған зақымдарды анықтай алады. ТОС арнайы қолданбалар үшін дизайн икемділігін қамтамасыз ететін нүктелік немесе бөлінген сенсорлар ретінде орнатылуы мүмкін. Түрлендіру процестеріне байланысты әртүрлі физикалық және химиялық датчиктерді жобалауға болады, бұл оларды өнеркәсіптік қолданбалардың кең ауқымында пайдалануға мүмкіндік береді.

Талшықты-оптикалық сенсор технологиясының дамуының арқасында қазір көптеген пайдалы қолданбалар бар. Мысалы, талшықты Брэгг торына негізделген сенсорлар нақты уақыт режимінде қалқан туннельдеріндегі

деформацияларды бақылап отырды. Бұл олардың операциялық жүктемелерден туындаған құрылымдық деформацияларды ұстау қабілетін көрсетті. Сол сияқты, теміржол көпірлерін бақылау үшін талшықты-оптикалық сенсорларды пайдалану пойыздар қозғалысының әсерінен болатын стресс өзгерістері туралы түсінік берді, бұл болжамды техникалық қызмет көрсету стратегияларының жақсаруына әкелді [2].

Оптикалық уақыт доменінің рефлексометрлері және зауыттық қалам өлшегіштер сияқты жаңа өлшеу механизмдері талшықты-оптикалық сенсорларды қолданудағы одан әрі жетістіктердің нәтижесінде пайда болды. Бұл технологиялар қысымды, деформацияны және температураны қоса алғанда, өлшенетін параметрлердің ауқымын кеңейтеді. Мысалы, дәстүрлі талшықты Брэгг торына негізделген сенсорлармен салыстырғанда, Шридеви және т.б. төмендетілген графен оксиді сияқты озық материалдарды пайдалана отырып, штамм сезімталдығының бес есе жақсарғанын көрсетті. Басқа зерттеуде Бремер және т.б. гидрогель негізіндегі талшықты-оптикалық сенсорлар бетон конструкцияларына ылғалдың енуін анықтай алатынын көрсетті. Бұл ұзақ мерзімді перспективада инфрақұрылымның нашарлауын азайтудағы талшықты-оптикалық сенсорлардың рөлін көрсетеді [3].

Таратылған талшықты-оптикалық сенсорларды пайда болуы құрылыс нысандарының жағдайын бақылау мүмкіндіктерін одан әрі кеңейтті. Рэлейлік және Бриллюэндік шашырау әдістерін қолдана отырып, ауқымды инфрақұрылым желілерін нақты уақытта бақылауға (ағыл. Real-Time Monitoring, RTM) мүмкіндік береді. Дәстүрлі дискретті сенсорлармен салыстырғанда, бөлінген сенсор жоғары ажыратымдылықтағы кеңістіктік деректерді қамтамасыз ете отырып, орнатудың күрделілігі мен құнын айтарлықтай төмендетеді. [4].

1.2 Талшықты-оптикалық сенсорлардың классификациясы

Қазіргі таңда талшықты-оптикалық сенсорлардың көптеген түрлері бар. Оларды, бақылау талаптарына сәйкес, бірнеше түрге бөлуге болады. Бірақта, жалпылама айта келгенде, талшықты-оптикалық сенсорлар өздерінің ықшам өлшемінің, жеңіл салмағының, электромагниттік кедергілерге төзімділігінің және мультиплексирлеу мүмкіндіктерінің арқасында қазіргі уақытта құрылыс нысандарының жағдайын бақылау, сейсмикалық бақылау және т.б. сияқты күрделі сценарийлерде кеңінен қолданылады. Мысалға, жиі қолданысқа ие болатындарының бірлері:

- Таратылған талшықты оптикалық сенсорлар — DOFS;
- Брэгг талшықты торына негізделген сенсор (FBG, Fiber Bragg Grating);
- Интерферометриялық сенсорлар (Фабри-Перо, Мах-Зендер және т.б.)

Төменде көрсетілген 1.1 кестеден, осы айтылған 3 ТОС-дың ерекшеліктерін, артықшылықтарын және кемшіліктерін білсеңіз болады.

Кесте 1.1 – ТОС ерекшеліктері, артықшылықтары және кемшіліктері

| ТОС типі | Ерекшелігі | Артықшылығы | Кемшілігі |
|---------------------------|---|---|--|
| DOFS | Талшықтың толық ұзындығы бойынша өлшейді | Үлкен нысандарды бақылау, кеңістіктік бақылау басымдығы | Алыс қашықтықтағы ақпарат тасымалдау кідірісі, тегіс емес материал бетіне орнатудың қиындығы |
| FBG | Нүктелік сенсор | Жоғары дәлдік, мультиплекстеу мүмкіндігі | Шектеулі бақылау қашықтығы, мультиплекстеудің жоғары құны |
| Интерферометриялық сенсор | Оптикалық толқындардың интерференциясына негізделген сенсор | Микродеформацияларға ерекше сезімталдық, жоғары дәлдік | Компоненттер мен қондырғылардың жоғары құны, металл немесе композитті материалдарға енгізу күрделілігі |

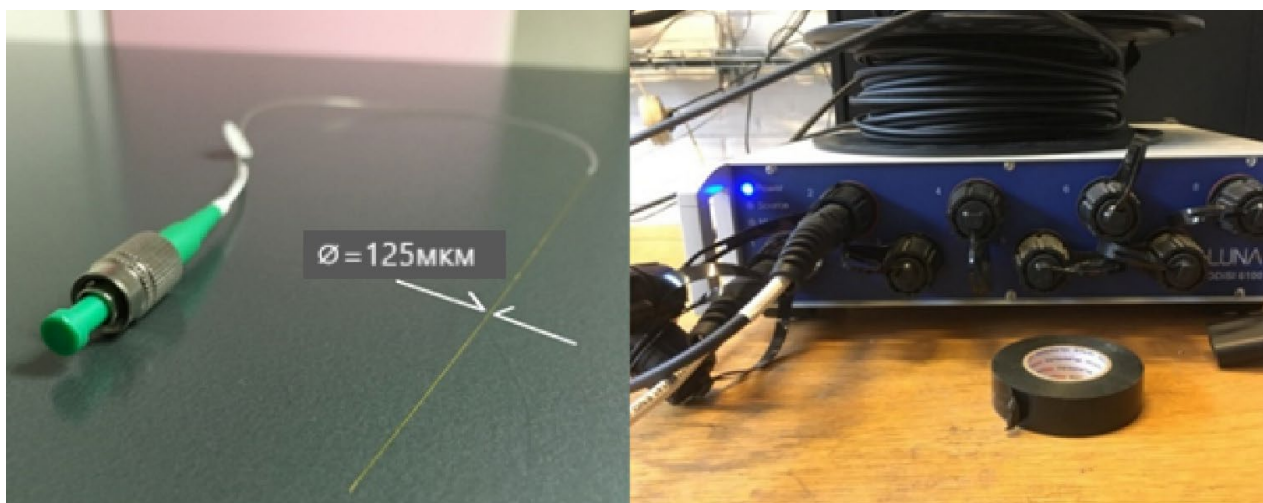
Таратылған талшықты оптикалық сенсорлар (DOFS) – бұл физикалық параметрлерді талшықтың толық ұзындығы бойынша өлшейтін сенсорлық жүйенің түрі.

DOFS жұмысы лазерлік импульстің оптикалық талшық арқылы тараған кезде шашырайтын сигналды талдауға негізделген. Жарықтың талшықты материалмен әрекеттесуі кезінде сыртқы ортадағы өзгерістер туралы ақпаратты қамтитын кері шашырау пайда болады. Шашыраудың үш негізгі түрін айтуға болады:

- Рэлейлік шашырау – деформациялар мен тербелістерді өлшеу үшін қолданылады;
- Бриллюэндік шашырау – температура мен деформацияға сезімтал, құрылымды бақылау үшін қолданылады;
- Рамандық шашырау – негізінен температураға сезімтал және термиялық бақылау үшін қолданылады.

Бұл шашыраудың әрқайсысының өзіндік спектрлік ерекшеліктері бар және DOFS жүйелері талшық бойындағы белгілі бір нүктеде температураның, кернеудің немесе басқа физикалық параметрлердің өзгерістерін анықтау үшін осы спектрлердегі өзгерістерді түсіндіреді.

Әдеттегі DOFS жүйесі сигналды жазатын және талдайтын оптикалық уақыттық рефлектометрден (OTDR) немесе сұраушыдан және бір уақытта сезгіш элемент пен деректерді беру арнасының рөлін атқаратын талшықты-оптикалық желіден тұрады (1.2 – сурет)[1].



1.2-сурет – Таратылған талшықты оптикалық сенсор және ODiSI-6000 рефлектометрі (сол жақтан оңға қарай)

Бір өлшеу сызығының ұзындығы ондаған километрге жетуі мүмкін, бұл DOFS-ті құбырлар, туннельдер, көпірлер, кабельдік трассалар және құрылыс іргетасы сияқты ұзын объектілерді бақылау үшін тиімді шешім етеді [5]. Мысал келтіретін болсақ, Барселона қаласында орналасқан, Сан-Пау ауруханасының іргелерінде DOFS енгізілген. Сенсордың көмегімен, 1 ғасыр бұрын салынған аурухананың құрылымдық жағдайын бақылау жүргізіледі.

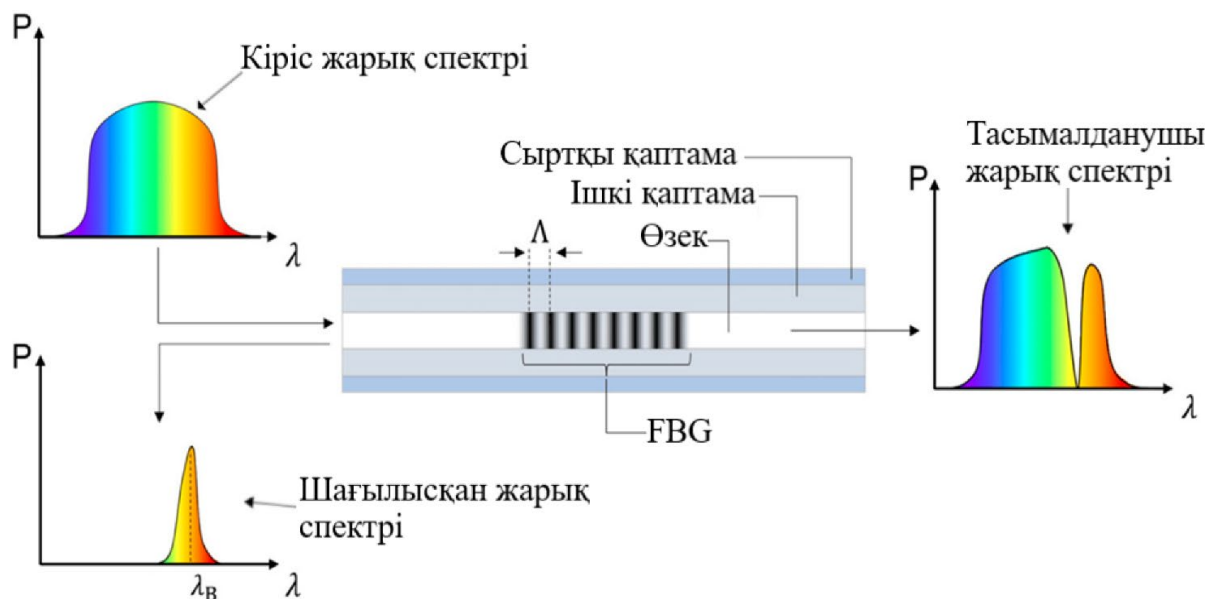
Дәстүрлі нүктелік сенсорлардан айырмашылығы, DOFS құрылымды пайдалану кезінде пайда болатын жергілікті зақымдарды, жарықтарды, деформацияларды немесе температура ауытқуларын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл көптеген нүктелік сенсорларды орнатуды қажет етпей-ақ ықтимал төтенше жағдайларды ерте анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, DOFS жүйелері материалдың температуралық режимін және отырғызуын бақылау үшін бетондау және қатыру кезеңдерінде белсенді қолданылады.

Брэгг талшықты торына негізделген оптикалық сенсорлары (FBG, Fiber-Bragg Grating) – «Брэгг торы» деп аталатын талшықтың бойынша жасалған периодты микроқұрылымды қамтитын ТОС болып табылады. FBG сенсорын бір модалы талшықты-оптикалық кабелінің өзегін, жанынан, қарқынды ультракүлгін лазер сәулесі арқылы әсер етудің көмегімен алуға болады. Сәулелену нәтижесінде талшық өзегінің сыну көрсеткіші тұрақты түрде артып, «тор» деп аталатын тұрақты көрсеткішті модуляциялайды. Талшықтың бойымен өтетін жарықтың белгілі бір толқын ұзындығы талшық өзегінің ішіндегі тор арқылы шағылысуы керек, ал қалған толқын ұзындығының барлығы сол арқылы өтуі керек (1.3 – сурет). Бұл толқын ұзындығы Брэгг толқын ұзындығы (λ_B) деп аталады.

Төменде FBG сенсорына арналған теңдеу көрсетілген:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

мұндағы λ_B – Брэгг толқын ұзындығы;
 n_{eff} – талшықтың эффективті сыну көрсеткіші;
 Λ – тордың периоды.



1.3-сурет – Брэгг талшықты торының жұмыс жасау принципі

Шағылысқан жарықтың толқын ұзындығы температураның өзгеруіне немесе тордың айналасындағы деформацияға байланысты тура пропорциональды өзгереді.

Брэгг талшықты торына негізделген сенсор құрылыста деформация, температура, қысым және діріл сияқты әртүрлі физикалық параметрлерді бақылау үшін жиі қолданылады. Ұзақ мерзімді бақылау үшін FBG сенсоры өте қолайлы болып табылады. Себебі FBG сенсоры экстремалды ауа райы жағдайларына төтеп бере алатын оптикалық талшықтардан тұрады.

Қазан ұлттық технологиялық зерттеу университетінің ғалымдары, Тимур Аглиуллин және оның әріптестері, FBG сенсорларымен әртүрлі секторларды бақылауға болатынын айта кетеді. Ғалымдар әр сектор үшін өзіндік параметрлерін келтірді, оның нақты мәндерін 1.2 кестеден бақылауға болады [6].

Кесте 1.2 – Әртүрлі секторлар бойынша FBG сенсорын қолдану нәтижелері

| Секторлар | Өлшем диапазоны, мм | Сезімталдылық, пм/мм | Артықшылығы |
|---|---------------------|----------------------|---|
| Азаматтық құрылыстар (көпір, дамба) | 0-50 | 23,96 | Жоғары беріктік, РТМ және электромагниттік кедергілерге төзімділік. |
| Алыс қашықтықтағы өнеркәсіптік қолданыс | 0-150 | 23,8 | Циклдік процестерге сәйкес келетін жоғары төзімділік |

| | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|---|
| Туннельдерді бақылау | 0-25 | 19,48 | Жоғары дәлдік, кең диапазонды өлшеу, RTM |
| Теміржол | 0-170 | 24,8 | RTM, жоғары сезімталдық, жоғары температураларға төзімділік |
| Құрылыстың нысандардың күйін бақылау | 0-110 | 39,47 | Кең диапазонды бақылау және жоғары сезімталдық |

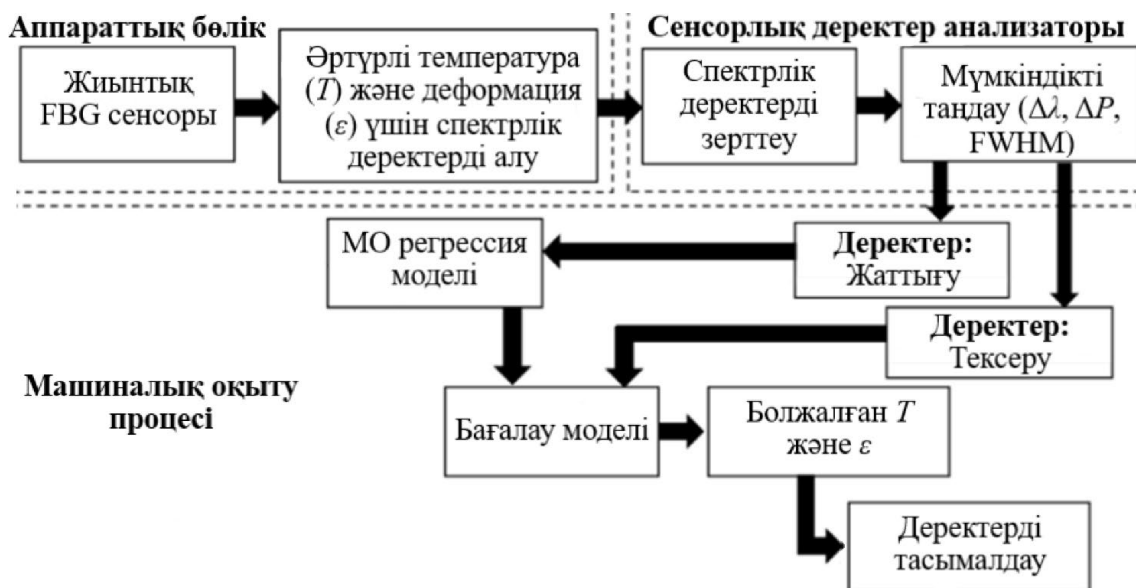
Сенсорды бетонға енгізу немесе арматураға бекіту арқылы конструкциялардың бойындағы өзгерістерді анықтауға болады (1.4 - сурет). Көбінесе көпірлерде, туннельдерде, көпқабатты үйлерде және т.б объектілерде қолданылады [1]. Дәл қазіргі уақытта FBG сенсорлары Қытайдағы көпірлерді, туннельдерді және биік құрылымдардың, нақты уақыт режимінде температура мен кернеу деңгейінің ауытқуы туралы мәліметтер береді және бақылау үшін қолданылады.



1.4-сурет – Бетонға енгізілген FBG сенсоры

FBG сенсорының мультиплекстеу қабілеті сенсорлық нүктелерді бір оптикалық сызық бойымен орналастыруға мүмкіндік береді, сонымен қатар құрылымдардағы коррозия мен деформациялар жайлы толыққанды ақпаратты береді [7]. Одан бөлек, FBG сенсорлары металл конструкцияларында сәтті қолданылады. Олар металдың жарылуын және одан кейін ұлғаюын бақылайды, оның ішінде қалыңдықтың жоғалту мен коррозия кезінде шағылысқан сәулелену спектріндегі өзгерістерді анықтайды [7, 8].

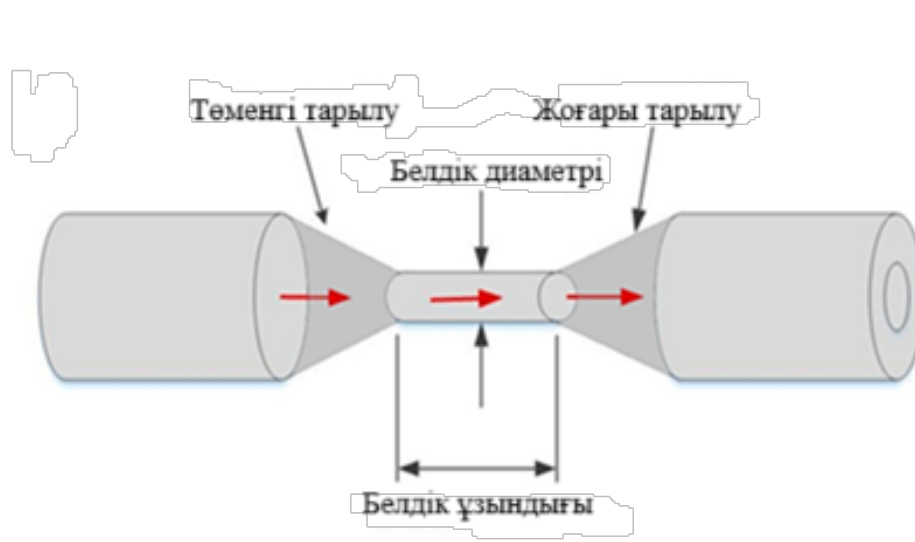
Қазіргі таңда өлшеу дәлдігін арттыру және жаңа FBG-жүйелердегі температураның әсерін төмендету үшін сигналдың температуралық және механикалық компоненттерін айыра алатын машиналық оқыту алгоритмдері пайдаланылады (1.5-сурет) [9].



1.5-сурет – Деформация мен температуралық болжамды талдау үшін қолданылатын машиналық оқыту және деректерді жинау әдісі

Шынайы қолданыс жағдайларында қоршаған ортаның өлшенетін шамаларға көрсететін әсері, бұл әдісті маңызды етеді.

Интерферометриялық талшықты-оптикалық сенсорлар (ИС) - оптикалық толқындардың интерференция құбылысына негізделген сезімталдығы жоғары өлшеуіш құрылғылар болып табылады. Сенсордың бұл түрі арқылы механикалық, акустикалық, температуралық және т.б. физикалық параметрлерін анықтауға болады (1.6 - сурет) [10].



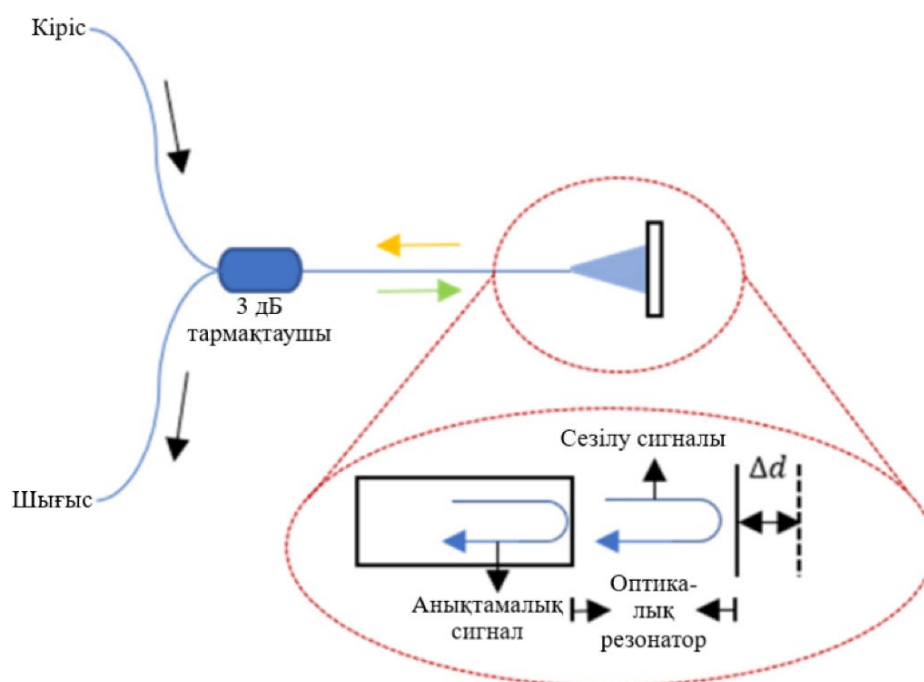
1.6-сурет – Интерферометриялық сенсор

Құрылыс саласында интерферометриялық талшықты-оптикалық сенсорлар микродеформацияларды, тербелістерді, дыбыстық сигналдарды және

динамикалық жүктемелерді бақылау үшін қолданылады. Сонымен қатар, ИС көп жағдайда көпмодалы оптикалық кабельдің негізінде қолданылады. Ол жайлы, Юйчэн Яо және басқалары осы мақалада айтады [11].

Жалпылама айта кетсек интерферометриялық сенсорлардың 4 негізгі түрін айта кетсек болады. Олар: Фабри-Перо, Мах-Цендер, Майкельсон и Саньяк интерферометрлері деп аталады.

Фабри-Перо интерферометрі (Fabry–Perot Interferometer, FPI) екі жартылай мөлдір айналардан құралған резонаторлық қуыстан тұрады [12]. Талшықты-оптикалық іске асыру сыртқы (экструзия) және ішкі (интрузивті) қондырғыларды пайдаланады. Жұмыс жасау принципінің құрылымдық сұлбасы келесі 1.7-суретте бейнеленген.



1.7-сурет – Фабри-Перо интерферометриялық сенсорының құрылымдық сұлбасы

Температура немесе қысым сияқты сыртқы факторлар қуыстың ұзындығына немесе сыну көрсеткішіне әсер ететіндіктен өзгерген кезде кедергі максимумы ығысады. Жоғары сезімталдық пен өндірістің қарапайымдылығына байланысты FPI сенсорлары құрылыс құрылымдарының деформацияларын бақылау үшін үлкен сұранысқа ие. Мысалы, [13] мақалаға силиконды резеңке диафрагмасы бар FPI негізінде жоғары сезімтал талшықты-оптикалық қысым сенсорын құру егжей-тегжейлі сипатталған. Ол төмен температуралық айқаспалы сезімталдықты және $-0,68 \text{ нм/кПа}$ сезімталдықты көрсетеді.

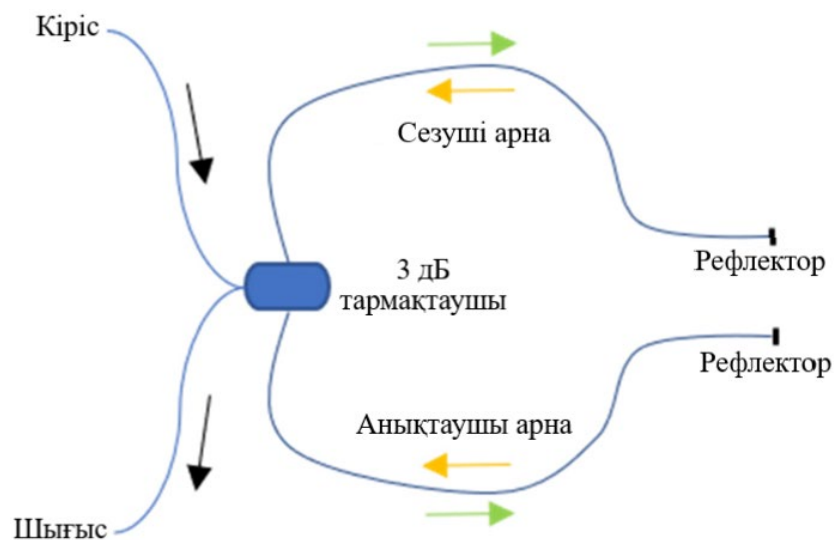
Мах-Зендер интерферометрі (Mach–Zehnder Interferometer, MZI) жарық сәулесін екі оптикалық тұтқаға немесе арнаға бөлу арқылы жұмыс істейді, олардың біреуі сыртқы басқарылатын параметрдің әсеріне ұшырайды. Жарық екі арна арқылы да өтеді, содан кейін толқындар қайта қосылып, фазалық

айырмашылықтарға сезімтал интерференция үлгісін жасайды. Бұл сұлбаны талшықты-оптикалық жүйелерде жүзеге асыру үшін бағыттаушы бөлгіштер мен байланыстырушы компоненттер қолданылады (1.8-сурет).



1.8-сурет – Мах-Зендер интерферометриялық сенсорының құрылымдық сұлбасы

MZI сенсорлары жоғары сезімталдыққа және діріл мен микроштамм сияқты статикалық және динамикалық өзгерістерді анықтау мүмкіндігіне байланысты құрылымдық бақылау жүйелерінде жиі қолданылады. Мысал ретінде белсенді аймақ ұзындығы небәрі 3,3 мм болатын керемет сезімталдықты (4629 нм/RIU дейін) көрсеткен қуыс фотонды кристалды талшықтарға салынған интерферометрді келтіруге болады [14].



1.9-сурет – Майкельсон интерферометриялық сенсорының құрылымдық сұлбасы

Майкельсон интерферометрі (Michelson interferometer, MI) - жоғары сезімталдыққа және сыртқы әсерлерге төзімділікке ие интерферометриялық талшықты-оптикалық датчиктердің бірі. Бұл құрылғыда жарық екіге бөлінеді, айналы беттерден бейнеленеді, содан кейін қайтадан біріктіріледі, нәтижесінде оптикалық жолдың өзгерістеріне сезімтал интерференциялық көрініс пайда болады (1.9-сурет).

Қазіргі заманғы зерттеулер MI негізіндегі сенсорлардың жоғары температуралы ортада перспективалы екенін көрсетеді. Юндонг және басқалары 109 пм/°С температуралық сезімталдыққа ие және 900 °С дейінгі температурада жұмыс істеуге қабілетті MI негізіндегі талшықты-оптикалық сенсорды ұсынды [15]. Жеткілікті ықшам өлшемдері, қарапайым құрылымы және жақсы тұрақтылығы бар бұл сенсор әртүрлі өнеркәсіптік қолданулар үшін перспективалы болып табылады.

Осындай экстремалды жағдайларда MI датчиктерінің тиімділік дәрежесі көптеген басқа да зерттеулермен расталады. Мысалы, Хан және басқалары MI негізінде жоғары сезімтал сенсор жасау үшін микросфералық құрылымдарды пайдаланды, сондай-ақ оның жоғары температурада жақсартылған сипаттамаларын көрсетті [16]. Ци және басқалары сыну көрсеткіші мен температураны елеулі дәлдікпен бір мезгілде бағалауды қамтамасыз ететін үш микросферадан тұратын массив негізінде датчик ұсынды [17].

Фабри-Перо, Майкельсон және Мах-Зендер интерферометриялық сенсорлары акустикалық жүктемелер мен тербелістерді бақылауға арналған ең сезімтал құрылғылар болып саналады. Зерттеушілер бұл сенсорлардың микродеформацияларды, басқа сенсорларға қарағанда, дәлірек табатынын атап өтті, бұл әсіресе динамикалық және сейсмикалық бақылау үшін маңызды. Дегенмен, оларды кеңінен қолдану нақты баптау мен тұрақты сыртқы ортаның жағдайына тәуелділігімен шектелетінін айта кетеді.

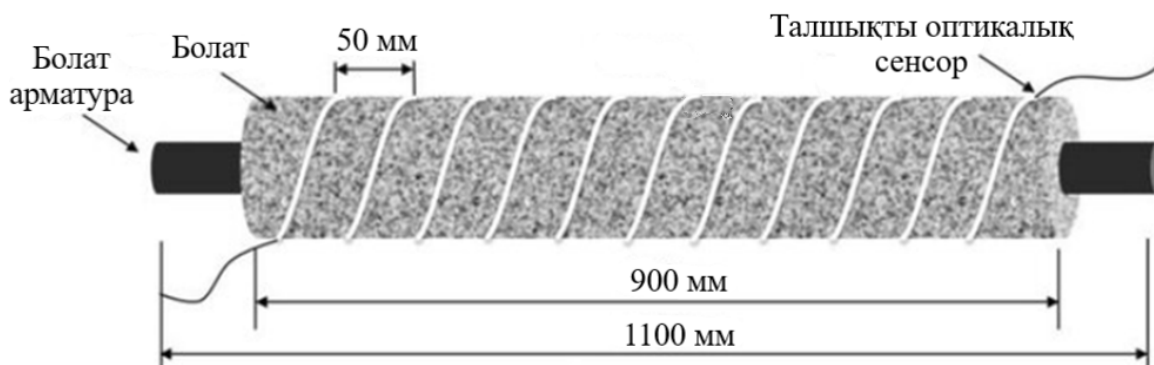
1.3 Металл-бетон конструкцияларында талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану туралы ғалымдардың пікірлері

Көптеген ғалымдардың ойынша, құрылыс материалдарына, оларды өндіру, дайындау кезінде ТОС-ды енгізу – өте эффективті тәсілдердің бірі. Бұл әдіс нысанды, салынған сәттен бастап үздіксіз бақылауға мүмкіндік береді. Көптеген ғалымдардың пікірінше, ТОС - «ақылды инфрақұрылым» идеясының маңызды компоненті. Жасанды интеллект және үлкен деректерді өңдеу жүйелерімен бірге пайдаланудың арқасында, бұл сенсорлар нысанның жағдайын бақылап қана қоймай, сонымен қатар құрылыс нысанының құлауын болжауға мүмкіндік береді.

Мысалы, Цяо және басқалары құрылыс нысанының іргелерінің беріктігін бақылау және болат арматурадағы коррозия белгілерін табу үшін бетонға ТОС-ды қалай енгізу керектігі туралы айтады [18].

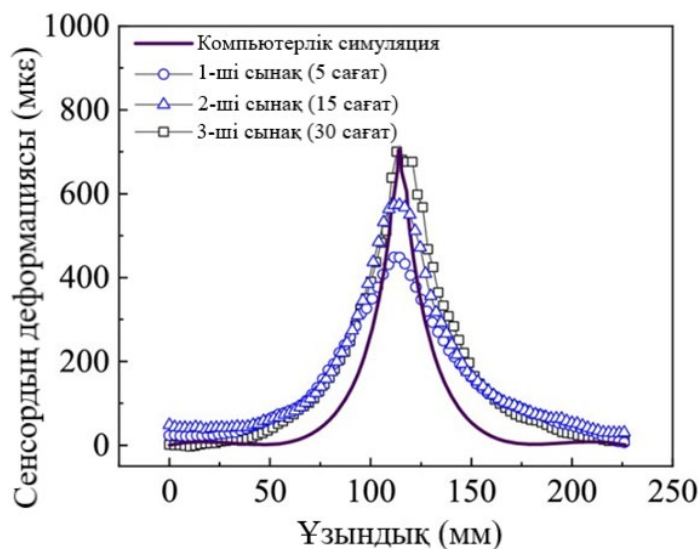
KU Leuven және Dalian университетінің зерттеушілері, Чжао және

басқалары, DOFS жүйесі арқылы құрылыс нысанын бақылау, болат арматурадағы коррозиядан туындаған жарықтарды өте айқын анықтай алатынын айтады. Ғалымдар DOFS сенсорларының бұл қасиетін, көптеген сынақтар жүргізу арқылы анықталғанын айта кетеді.



1.10-сурет – DOFS арқылы арматурадағы коррозияны анықтау әдісі

Жоғарыдағы 1.10-суретте ғалымдар, ұзындығы 1100 мм арматураның сыртын, қалыңдығы 40 мм цемент ерітіндісімен қабаттап, бетонға 50 мм интервалмен талшықты сенсор орамасын енгізу арқылы металл-бетондық конструкциялардың жағдайын анықтауға болатынын көрсетеді. Мақаладан, зерттеушілер сынақтардан келесідегідей нәтиже алынғанын байқасақ болады (1.11 – сурет):



1.11-сурет – Коррозияға байланысты бетонның деформацияларын салыстыру кезіндегі, 30 сағаттық сынақтың графикалық моделі

Эксперименттік нәтижелерге сүйенсек, деформация шыңдары талшықты датчиктердің бүкіл ұзындығы бойынша бетон жабынының жарылуы немесе болат арматураның жергілікті коррозиясы нәтижесінде пайда болады. Ал қоршаған орта жағдайлары, негізінен ылғалдылық деңгейі коррозияның да,

деформацияның да себебі болып табылатынын айтады.

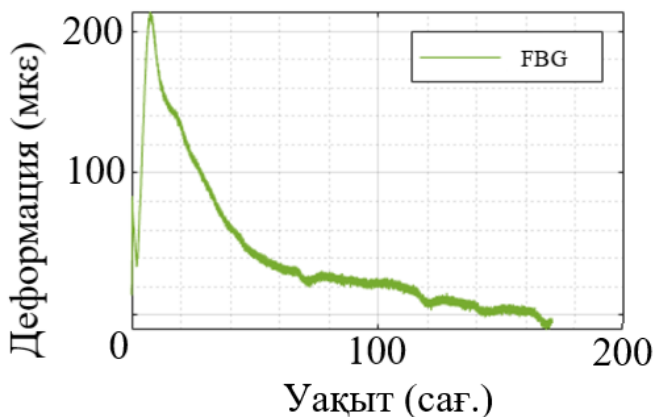
Осылайша, Чжао және оның әріптестері, болат арматураның коррозияға ұшырауынан туындаған бетонның жарылуын анықтау және бақылауда DOFS жүйесі тиімді шешім екенін баса айтады [19]. Зерттеушілер Бриллюэн мен Раман эффектілеріне негізделген DOFS сенсорлары кабельдің бүкіл ұзындығы бойынша ең аз ауытқуларды анықтауға мүмкіндік беретінін, бірақ сигналдың күрделі интерпретациясын және айтарлықтай өңдеу қуатын қажет ететінін атап өтті.

Эдсон Соуза мен оның әріптестерінің пікірінше, металл-бетон конструкцияларында, бетонның шөгуді кезіндегі сенсорларды енгізу аса маңызды шешім. Ғалымдардың зерттеулерінде, «ақылды» бетонға FBG сенсорларын енгізген кейінгі сынақтар мен есептеулер жүргізілді (1.12-сурет).



1.12-сурет – Бетонға енгізілген сенсорға иілу деформациясының әсерін көрсету сынағы

Айтылған сынақ бойынша бетон деформациясының, өткен уақыт бойынша сенсорға көрсететін әсерінің графигі төменде көрсетілген:



1.13-сурет – FBG сенсорлары арқылы деформацияны қадағалау нәтижесі

Графиктегі қисық арқылы көрсетілген деформацияның жоғарылауы, бетонды төсеу нәтижесінде пайда болатын оптикалық талшықтағы тартылудың бұрмалануына сәйкес келеді. Осыған байланысты, Эдсон Соуза, ұсынылған өлшеу әдісін бетонды төсеу уақытын бағалау үшін қолдануға болатынын айтады [20].

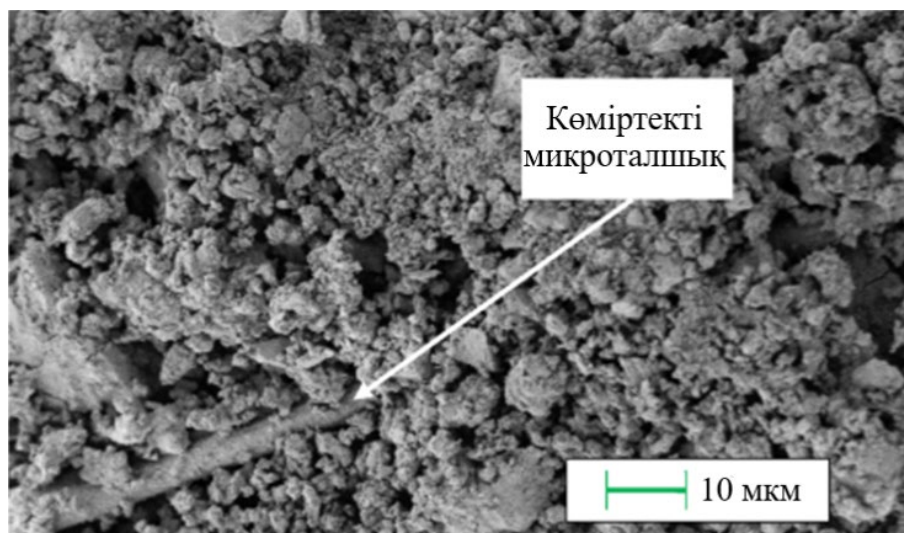
Зерттеулерге сәйкес, FBG сенсорлары бетон және металл бетон конструкцияларындағы термомеханикалық процестер мен деформацияларды нүктелік бақылау үшін әсіресе пайдалы. Ғалымдардың пікірінше, олар биік ғимараттарды, көпірлер мен туннельдерді қоса алғанда, маңызды құрылымдық нысандарды бақылау үшін өте қолайлы.

2022 жылы Sensors журналында, көміртекті микроталшықтарды қолдану арқылы, өзідігінен сезімтал қасиеттері бар көп функционалды бетонды зерттеу туралы мақала жарияланды. Мақала авторлары, Антонелла Д'Алессандро және басқалары, кішкентай, орташа және толық өлшемдегі үлгілермен сынақ жасады.



1.14-сурет – Көміртекті талшықтар қосылған бетон үлгілері

Көміртекті микроталшықтар ең жақсы өткізгіштік пен сезімталдыққа қол жеткізу үшін үлгілерді дайындау процесінде бетон қоспасына әртүрлі мөлшерде қосылды (1.14-сурет).



1.15-сурет – Бетонға енгізілген көміртекті микроталшықтың микроскоп арқылы көрінісі

Ғалымдардың пікірі бойынша, «ақылды» бетон сенсорларының сезімталдығы, композиттің электр өткізгіштігі мен пьезорезистивтілігі тікелей тәуелді. Осыған байланысты электродтар арасындағы кез келген аймақтың кедергісін анықтау үшін, зерттеушілер келесі формуланы ұсынды:

$$R = \rho_r \frac{e}{A} \quad (1.2)$$

мұндағы ρ_r – материалдың меншікті кедергісі;

e – электродтар арақашықтығы;

A – электродтар арасындағы көлденең қима ауданы [21].

Осылайша, ғылыми қоғам талшықты-оптикалық сенсорлар құрылыс құрылымдарын бақылаудың әлеуетті құралы екенін мойындайды. Көптеген зерттеулер жоғары сезімталдықтың, электромагниттік тұрақтылықтың, қатал климаттық жағдайларға төзімділіктің және үлкен диапазонның арқасында ТОС құрылыс секторындағы дәстүрлі электр сенсорларынан артықшылығы бар екенін атап көрсетеді.

Сонымен қатар, ғалымдар ТОС құрылымдық диагностика жолағын көтеретінін және құрылыс компоненттері мен материалдарына кіретін интеллектуалды бақылау жүйелерін ұйымдастыруға мүмкіндік беретінін түйіндейді. Сондай-ақ жабдықтың құнын төмендетудің, деректерді түсіндірудің неғұрлым тиімді әдістерін жасаудың және технологияны құрылыс объектілерінің бірегей талаптарына бейімдеудің маңыздылығын айтады.

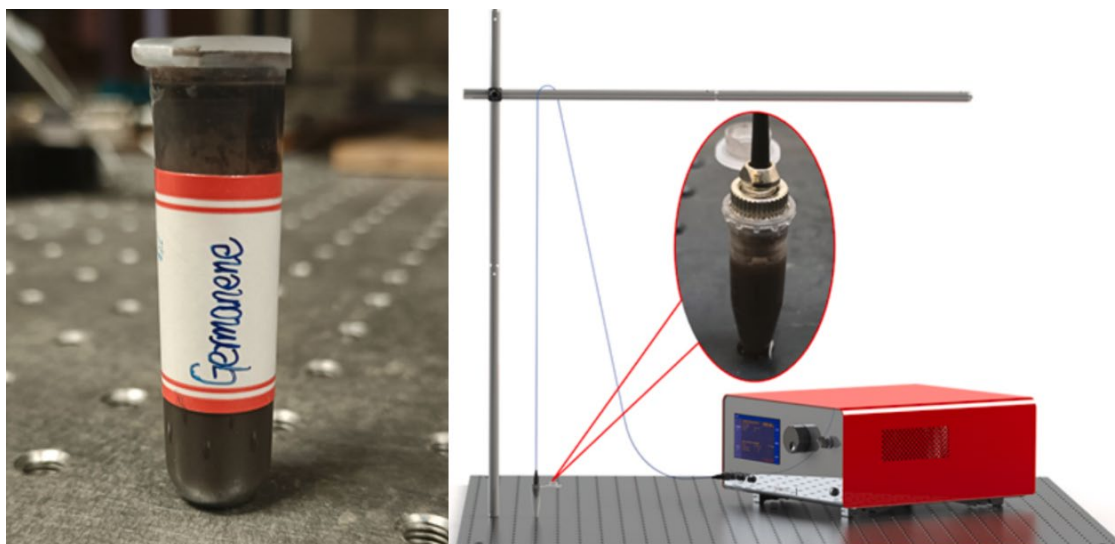
2 Талшықты-оптикалық сенсорларды өндіру және енгізу әдістері

2.1 Талшықты-оптикалық сенсорлардың жасалуы және жазылуы

Құрылыс конструкцияларының мониторингі үшін талшықты-оптикалық сенсорларды жасау және өндіру үшін маңызды және мұқият жұмыс жүргізіледі. Қарапайым талшықты-оптикалық кабельді, оның оптикалық қасиеттерінің арқасында, бірден ТОС ретінде пайдалануға болады. Мысал ретінде, ертерек айтып өткен DOFS сенсорларын келтірсек болады. Себебі, бұл сенсорлар, жарықтың шашырау қасиеті бойынша температуралық өзгерістер мен деформацияларды анықтай алады. Ал ТОС-дың басқа түрі, яғни FBG сенсорлары, қарапайым талшықты-оптикалық кабельді түрлендіру арқылы жасалынады.

FBG сенсорларын дайындаудың жоғары дәлдіктегі технологиясы оптикалық талшық өзегінің ультракүлгін (УК) жарыққа жоғары сезімталдығына негізделген. Төтенше жарық сезімталдығына байланысты FBG өзегі бір немесе көп модалы талшықты, көбінесе германийді пайдалана отырып қалыптасады. Ультракүлгін сәуленің өзекке тиімді берілуін қамтамасыз ету үшін тор жазылатын аймақтағы талшықты полимерлі қаптаудан толығымен тазарту керек.

Бұл істегі бірінші қадам қолайлы оптикалық талшықты таңдау болып табылады. Германиймен қоспаланған талшық ультракүлгін сәулеге өте сезімтал болғандықтан, оны жиі пайдаланады (2.1-сурет).



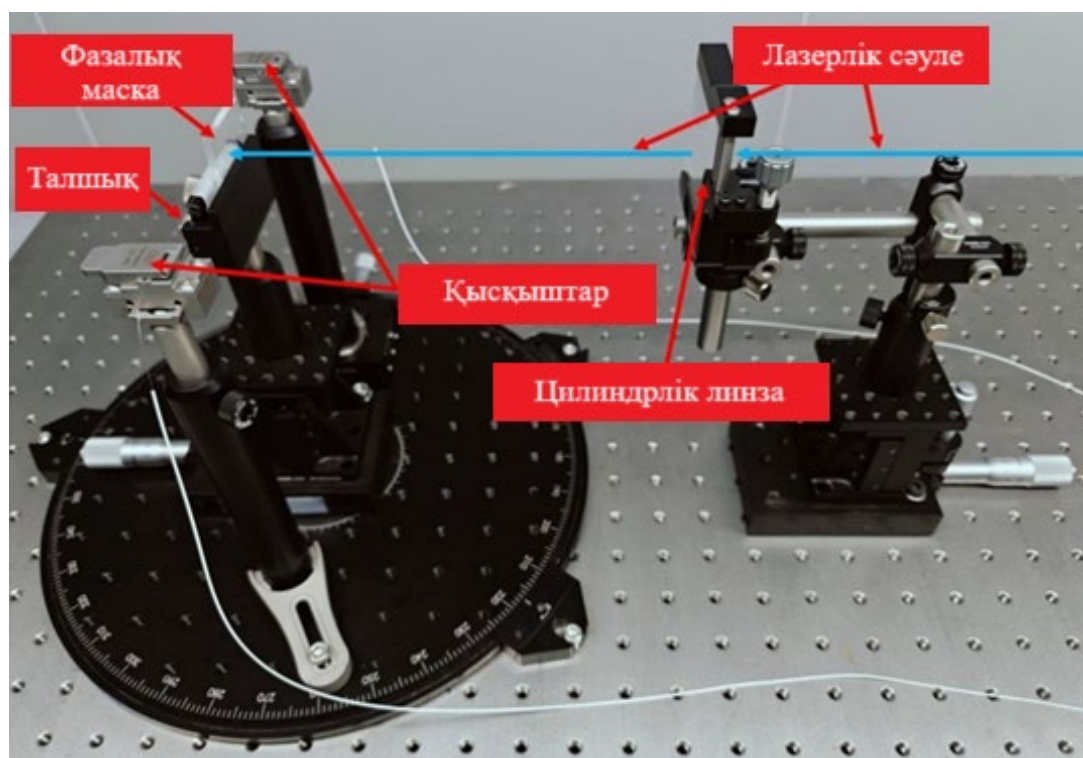
2.1-сурет – Германийды қолдана отырып ТОС дайындау

Жарық сезімталдығын арттыру үшін талшықты автоклавта, шамамен 10 МПа қысымды қолдана отырып, сутегімен 7 тәулік мерзімінде қанықтырады (2.2 - сурет). Мұндай әрекет, кейіннен УК-лазердің көмегімен торларды жазу тиімділігін арттырады [22, 23].



2.2-сурет – ZwickRoell HA 100 автоклавы

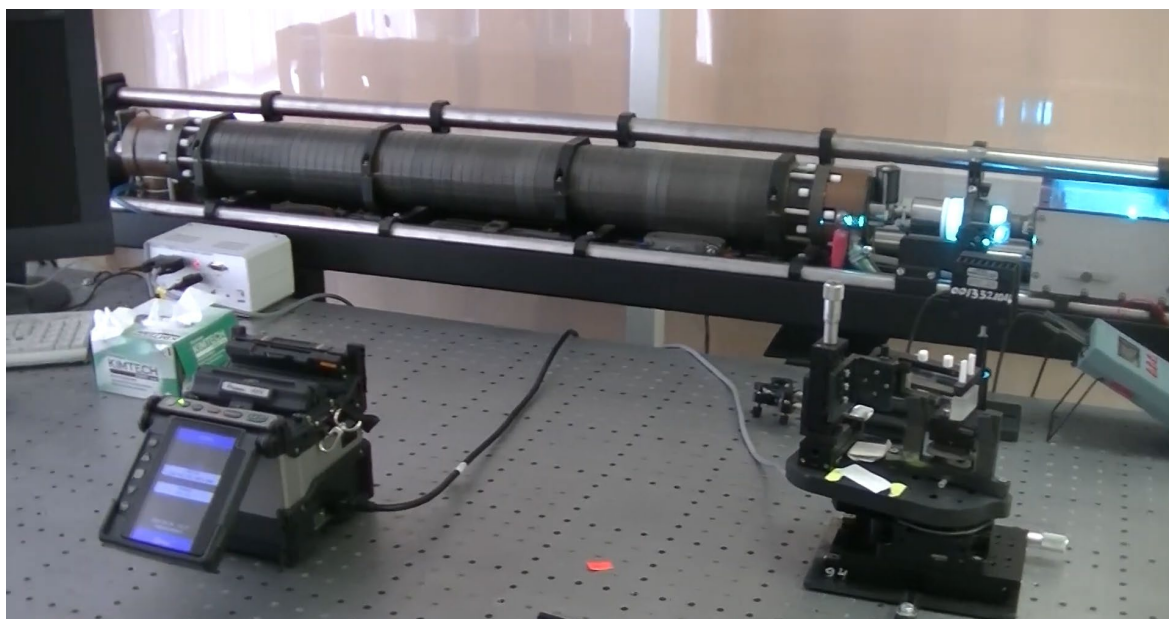
Келесі қадам – тордың өзін талшыққа енгізу. Ең қарапайым тәсілдердің бірі – талшыққа фазалық маска арқылы, 266 нм ультракүлгін лазермен әсер ету. Осы тәсіл арқылы талшыққа торды енгізуге арналған тәжірибелік қондырғыны келесі 2.3-суреттен көре аласыз. Талшық маска астында бекітіледі, ал лазерлік импульстар материалдың оптикалық сипаттамаларын периодты түрде өзгертеді, солайша тордың қажетті периодтығын құрады. Талшық торы жазылғанынан кейін, материалды 120-200 °С температурада, термиялық тұрақтандырылады. Бұл сенсордың сенімділігі мен беріктігін арттырады [23].



2.3-сурет – Талшықты торды дайындауға арналған тәжірибелік қондырғы

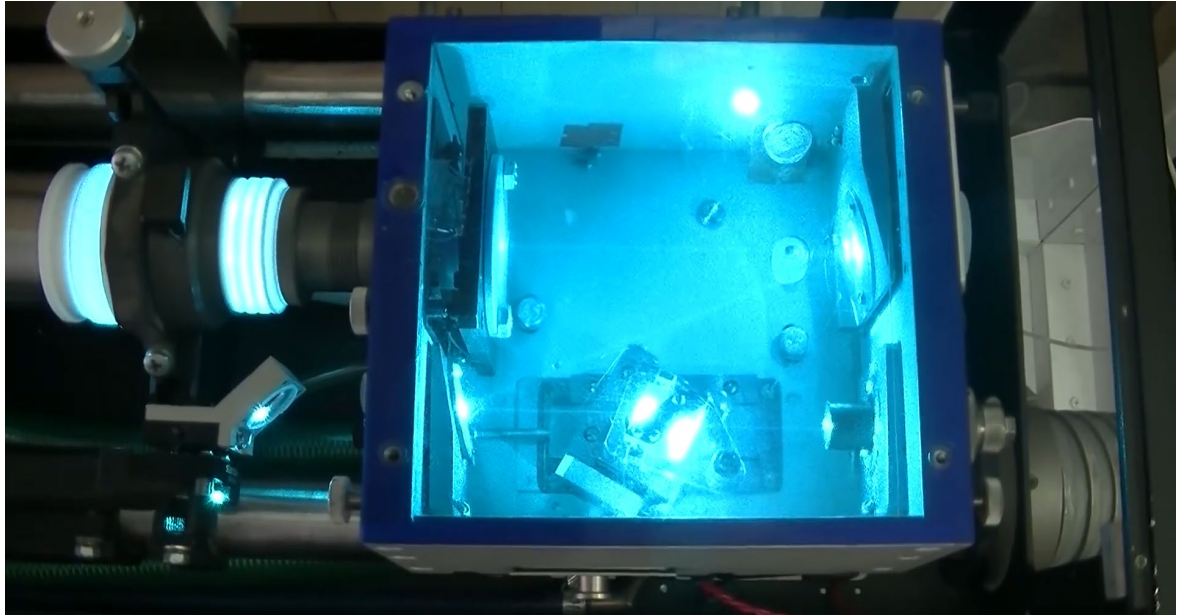
Жаппай өндіріс үшін жылжымалы фазалық маскалар немесе күрделі лазерлік жүйелер сияқты автоматтандырылған жүйелер пайдаланылады. Бір талшықта көптеген торларды бір уақытта жазу мүмкіндігінің арқасында бұл өндірістік шығындарды төмендетеді және параметрлердің қайталануын қамтамасыз етеді [9, 24].

Осыған ұқсас тәжірибені А.Н. Туполев атындағы Қазан ұлттық зерттеу техникалық университетінің, радиофотоника және микротолқындық технологиялар кафедрасының доценті Кузнецов А. А. жасады. Доцент кафедра лабораториясындағы ультра-күлгін сәулелі лазер арқылы оптикалық талшыққа Брэгг торын енгізетін қондырғыны көрсетеді. Қондырғыны келесі 2.4-суреттен көруге болады.



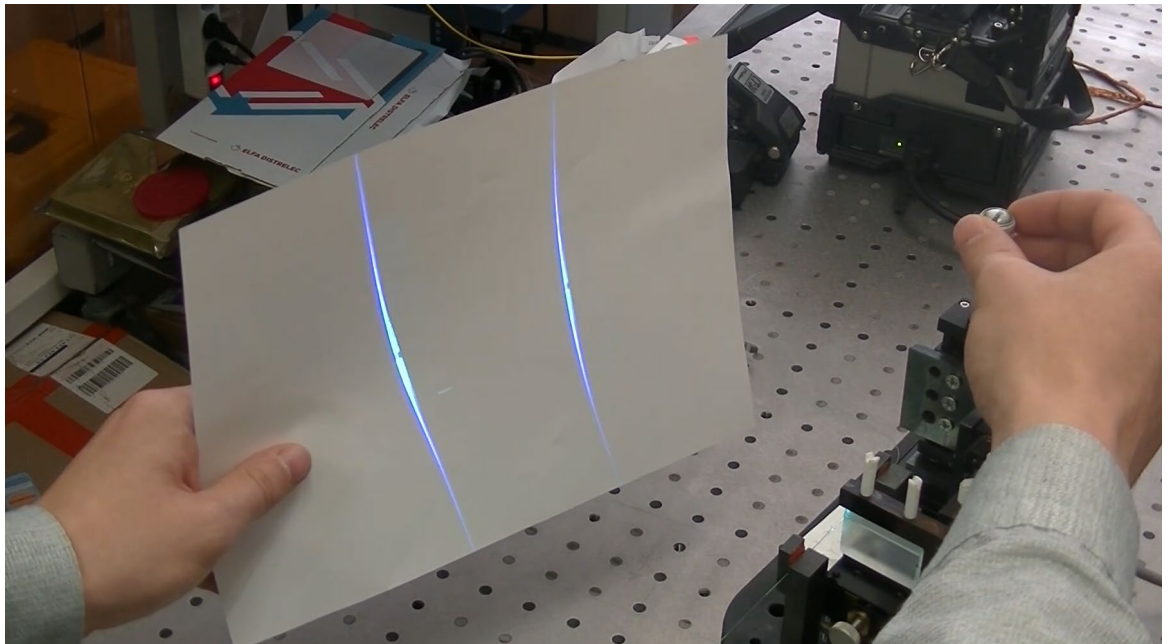
2.4-сурет – УК сәулелі лазер арқылы ТОС-ға тор енгізуші қондырғы

Оптикалық талшыққа торды енгізуші лазердің қуаты 10 Вт құрайды. Лазерлік модуляция қорабына кіріп тұрған аргон лазерінің сәулесі, сызықтық емес, барий боратынан жасалған кристаллдан өтеді. Кристалл лазер сәулесінің жиілік екі есе көбейтіп, толқын ұзындығын 2 есе қысқартады, солайша аргон лазерінің сәулесі УК сәулесіне түрленеді. Осы процесстің көмегімен түрленетін УК сәулесін оптикалық талшыққа торды енгізу үшін қолданады. Төмендегі 2.5-суретте лазерлік модуляция қорабы айқын бейнеленген.



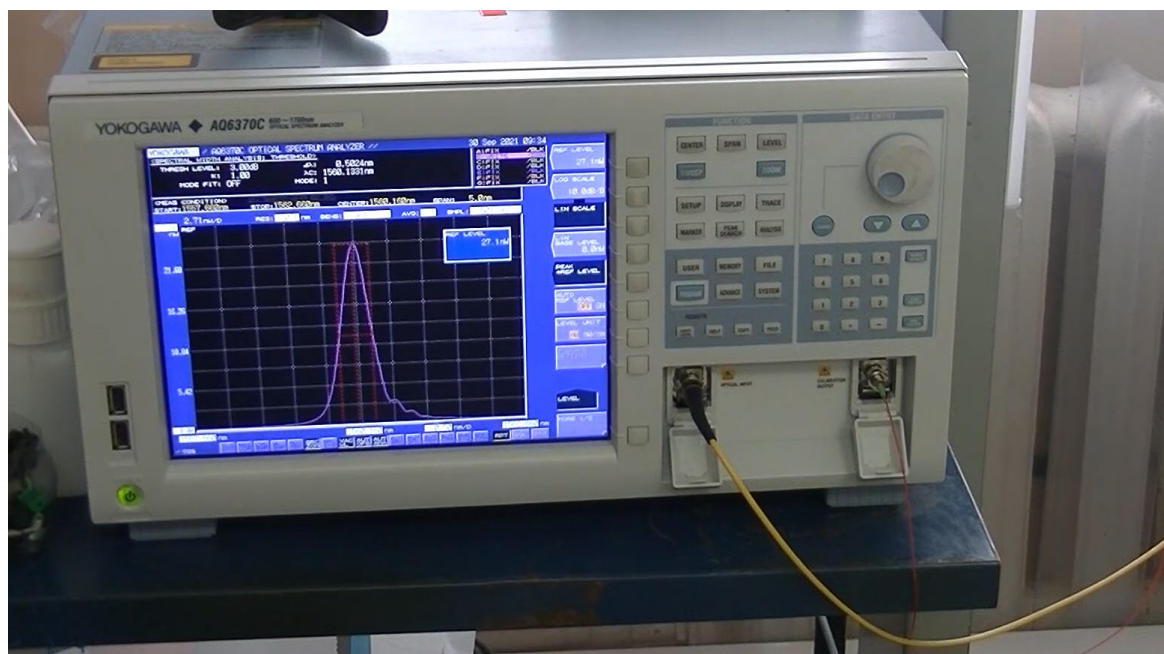
2.5-сурет – Лазерлік модуляция қорабы

Талшық сыртқы қаптамасынан тазартылғаннан кейін, жазу құрылғысына орнатылып, УК сәулесінің бағытын реттеу процесі жүргізіледі. Төмендегі 2.6-суреттен УК сәулелерінің шашырауы және дефракциясын байқауға болады.



2.6-сурет – УК сәулелерінің шашырауы және дефракциясы

Оптикалық талшыққа тордың жазылуы оптикалық спектр анализаторының көмегімен бақыланады. Анализатордың осциллографы шағылысқан жарық спектрін көрсетеді (2.7-сурет). Тордың шағылысу коэффициенті қажетті шамаға жеткен кезде, жазылу автоматты түрде тоқтатылады. Осылайша, FBG сенсоры жасалынады.



2.7-сурет – YOKOGAWA AQ6370C оптикалық спектр анализаторы

Оптикалық спектр анализаторының техникалық сипаттамаларын төмендегі кестеден көруге болады [25].

Кесте 2.1 – YOKOGAWA AQ6370C оптикалық спектр анализаторының техникалық сипаттамалары

| Параметрлер | Мәндер |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Толқын ұзындық диапазоны | 600-1700 нм |
| Толқын ұзындығының дәлдігі | ±0,01 нм |
| Кең динамикалық диапазоны | 78 дБ |
| Кең деңгейлік диапазоны | -90 - +20 дБм |
| Өлшеу уақыты | 0,2 секунд |
| Қолдануға болатын талшық түрлері | Бір және көп модалы талшықтар |

2.2 Талшықты-оптикалық сенсорларды құрылыс материалдарына енгізу әдістері және оның әсері

Бетон, темірбетон, кірпіш, асфальтбетон және композиттік материалдар жоғары сезімталдығы, сыртқы әсерлерге төзімділігі және жоғары ылғалдылық, температура және электромагниттік кедергілер жағдайында жұмыс істеу

кабілетіне байланысты параметрлері ТОС көмегімен жиі бақыланатын материалдардың қатарына жатады. Талшықты оптикалық сенсорларды құрылыс материалдарына енгізудің бірнеше әдісі бар. Сенсорды енгізудің ең танымал технологиясы – бұл сенсорды материалды қалыптау кезінде орналастыру. Мысалы, DOFS немесе FBG сенсорлары темірбетонды ғимараттар құрылысында бетон ерітіндісі құйылмас бұрын болат арматурамен бірге ерітіндіге енгізіледі.

Қазіргі уақытта қолданылатын негізгі әдістерді айта кететін болсақ, олар:

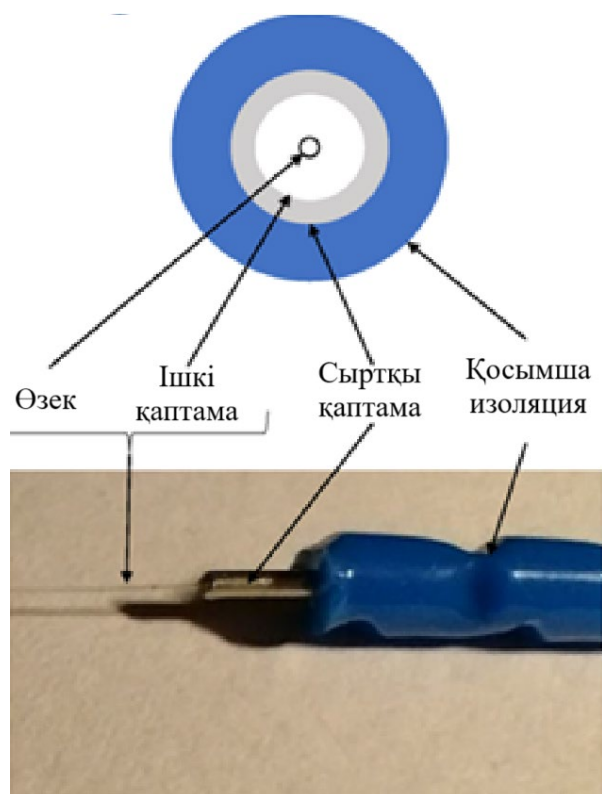
- Бетонға құйылу кезеңінде енгізу;
- Болат арматураға бекіту;
- Композитті материалдарға (тоқыма, пластик және т.б.) енгізу.

Бетон ерітіндісі құйылу кезеңінде сұйық жағдайының әсерінен, өте көп мөлшерде жылулық энергиясын бөледі. Бөлінетін жылу кейінгі уақыттарда бетонның ерте деформацияларына әкеліп соғады. Соның кесірінен құрылыс нысандарының «өмір сүру» уақыты ұзаққа бармайды. Бұл мәселені сенсорды материалды қалыптау кезінде орналастыру шешеді.



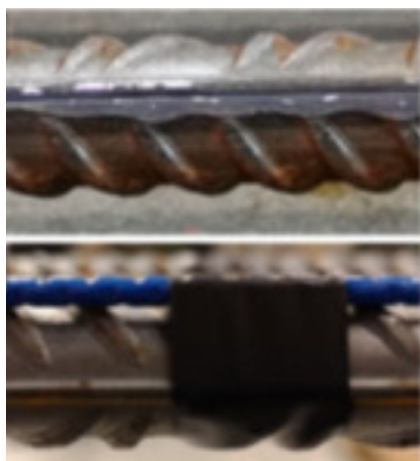
2.8-сурет – Бетон ерітіндісінің құйылу кезінде ТОС енгізу тәжірибесі

Енгізілетін ТОС арнайы қорғаныс қаптамасымен қапталады. Бұл ТОС-ды температуралық өзгерістер мен деформацияны анықтау үшін тиімді әрі ұзақ уақытта қолдануға мүмкіндік береді. Қаптау әдісін келесі 2.9 – суреттен көруге болады [26]:

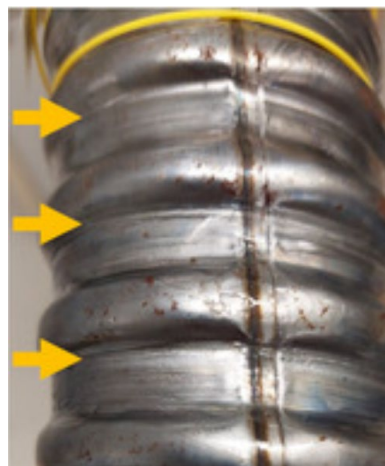


2.9-сурет – Арнайы қаптамалы ТОС

ТОС-ды болат арматураға бекіту арқылы физикалық параметрлерді бақылау әдісі де, өте оңтайлы болып табылады. ТОС болат арматураға көп жағдайда екі түрлі тәсілмен енгізіледі: болат арматура сыртына және ішіне. Яғни, цианоакрилат немесе эпоксидті шайыр сияқты желімдердің көмегімен оптикалық талшық тікелей арматураның бетіне жабыстырылады. Талшықты механикалық зақымданудан және бетонның қатал жағдайынан қорғау үшін оған силикон сияқты қосымша жабын қолданылуы мүмкін. Бұл тәсіл құрылымдағы кернеулер мен деформацияларды дәл бақылауға мүмкіндік береді және деформациялардың арматурадан сенсорға сенімді берілуіне кепілдік береді. Ал, екінші тәсілді айтатын болсақ, бұл тәсілді қолданған кезде оптикалық талшық арматураның бетінде жасалған бойлық ойықтарға енгізіледі. Осыдан кейін талшық желіммен тығыздалады және қоршаған ортаның әсерінен қорғалады. Бұл тәсіл өлшеу дәлдігін жақсартады және талшықтың сенімді бекітілуін қамтамасыз етеді. Келесі беттегі 2.10–суретте сенсорларды арматураға бекітудің екі тәсілі де айқын көрсетілген [1, 26, 27].



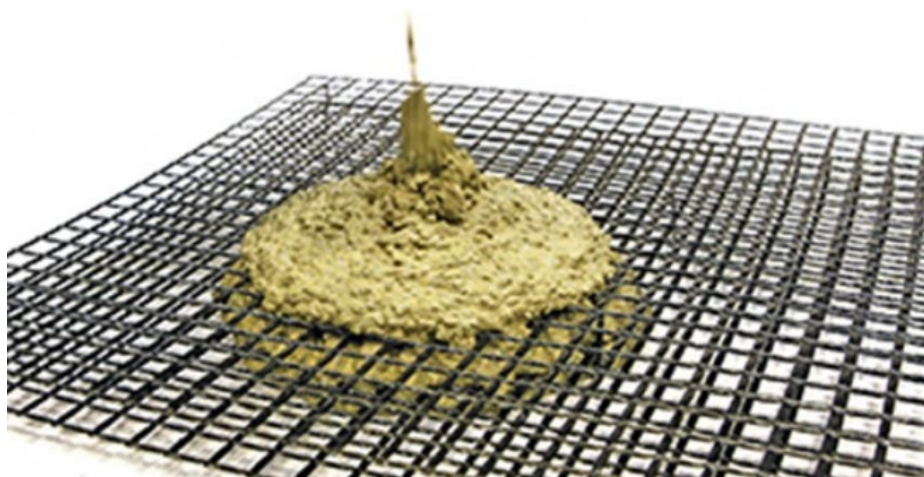
а)



ә)

2.10-сурет – Болат арматураға ТОС бекіту тәсілдері:
а) Болат арматура сыртына; ә) Болат арматура ішіне

Солайша, бетон ерітіндісін болат арматуралармен нығайтудан бөлек, бетонның жағдайын бақылауға болады (2.11-сурет) [28].



2.11-сурет – Болат арматурадан жасалған торға бетон ерітіндісін құю

Егер ТОС-ды енгізудегі осы әдістің артықшылықтары туралы айтатын болсақ, олар келесідей: талшық пен арматура арасындағы тығыз байланысты сақтау құрылымдағы деформациялар мен кернеулерді өлшеудің жоғары дәлдігіне кепілдік береді; арматураның ішіне немесе үстіне талшықты орналастыру бетонның механикалық зақымдануынан және агрессивті ортасынан қорғауды қамтамасыз етеді; арматура арқылы ТОС-ды енгізу бүкіл қызмет ету мерзімі ішінде құрылымның күйін үздіксіз бақылауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар жоғарыда айтылғандай сенсорларды енгізудің тағы да бір әдісі бар, ол - композитті материалдарға енгізу. Қазіргі уақытта композитті материалдарға енгізудің ең тиімді әдісі тоқымалы сенсорларды енгізу. Тоқыма-арматуралы бетон (Textile-Reinforced Concrete, TRC) сияқты, бетон негізіндегі

композициялық материалдардың жағдайын бақылап, нығайту үшін ТОС қолдануға ерекше назар аударылады. Материалдың құрылымдық тұтастығын бұзбай, бұл технология температураны, деформацияларды және басқа механикалық және физикалық сипаттамаларды тікелей бақылауға мүмкіндік береді.



2.12-сурет – ТОС-ды тоқымаға енгізуші жазу машинасы

Жоғарыда көрсетілген машинаның көмегімен тоқымаға ТОС – ды енгізуге болатынын, Сабрина Абедин және басқалары, өз мақалаларында айта кетеді [29]. Оптикалық талшықты арматуралық матаның қабаттары арасында орналастыруға болады және сіңдіру арқылы композициялық материал жасау кезінде байланыстырғышпен бекітіледі (мысалы, ламинаттау). Бұл композиттегі деформациялардың таралуын бақылауға мүмкіндік береді және материалдың құрылымына сенімді интеграцияға кепілдік береді. Тоқымалы оптикалық сенсордың құрылыс нысандарындағы көрінісі қандай болатынын келесі беттегі 2.13 – суреттен байқаса болады. Көріп тұрғандарыңыздай тоқыманың «торлы» іздері бетонның бетінен көрінеді [28].



2.13-сурет – Тоқымалы FBG сенсорының құрылыс нысандарындағы көрінісі

Төмендегі 2.2 кестеден енгізудің 3 әдісінің салыстыруын көруге болады.

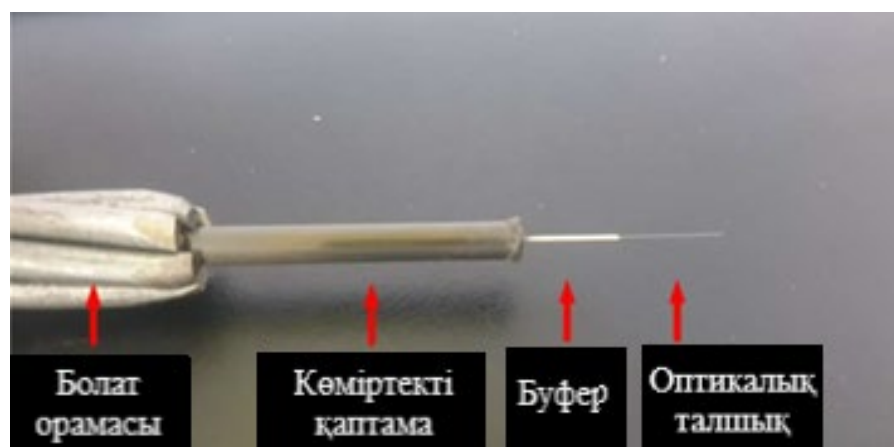
Кесте 2.2 – Енгізу әдістерін салыстыру

| Параметр | Бетонға құйылу кезеңінде енгізу | Болат арматураға бекіту | Композитті материалдарға енгізу |
|--|--|---|---|
| Күрделілік деңгейі | Орташа | Төмен | Орташа-жоғары |
| Орнату кезінде зақымдану ықтималдылығы | Жоғары (құйылу кезінде) | Орташа | Төмен |
| Сенсорды бекітудің сенімділігі | Төсеу сапасы мен бетон типіне байланысты | Құрылымның қаттылығының арқасында жақсы | Өте жақсы (сенсор тоқылған) |
| Микродеформация-ларға сезімталдылығы | Орташа | Орташа-жоғары | Жоғары |
| Сілтілік ортадан қорғау | Қосымша қаптаманы қажет етеді | Арматурадағы қорғаныс жабыны болуы мүмкін | Жоғары, әсіресе композициялық талшықтарды қолданған кезде |

| | | | |
|--|---|--|--|
| Сәтті енгізудің пайызы (мақалалардағы ақпарат бойынша) | ~75-80% [18] | ~85-90% [30] | ~90-95% [28] |
| Артықшылықтары | Құрылыс алаңында іске асырудың қарапайымдылығы, монолитті құрылымдармен жоғары үйлесімділік | Жақсы қорғаныс, тасымалдаушы элементтермен интеграция; | Жоғары сезімталдық, жаңа композиттермен үйлесімділік жұмыс |
| Кемшіліктері | Бетонды төсеу кезінде зақымдану мүмкіндігі, диагностиканың күрделілігі | Икемділіктің шектеулігі, дәл бекіту қажеттілігі | Өндірістің күрделілігі, жоғары құны |

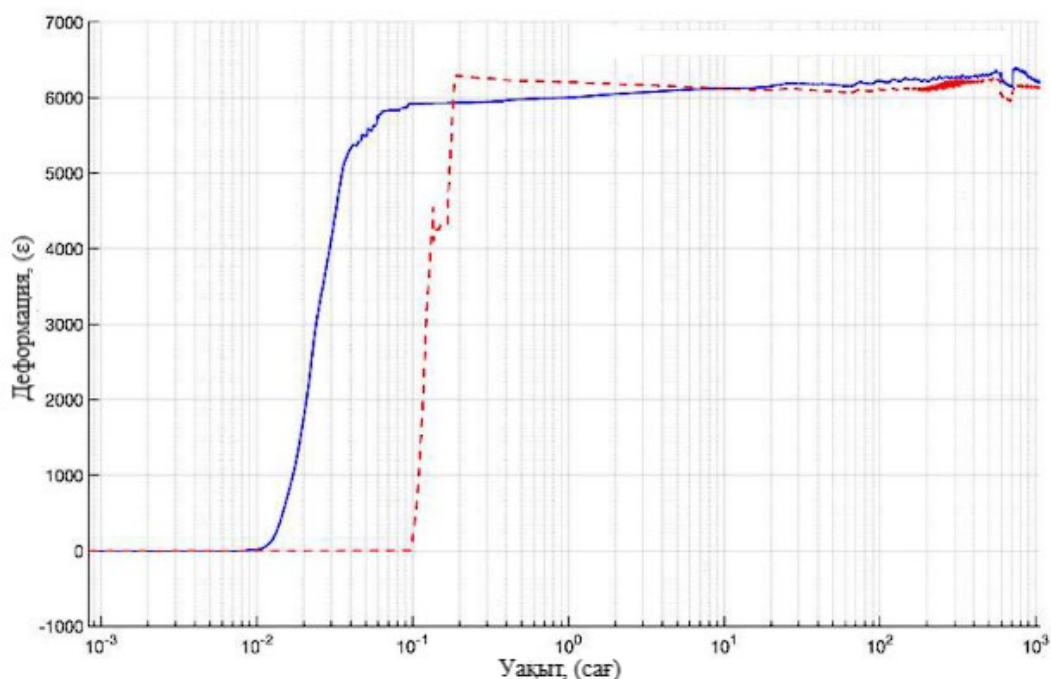
2.3 Қазіргі уақытта әлем бойынша қолданылуы

Соңғы жылдары FBG немесе DOFS сенсорларды азаматтық құрылыс саласында қолдану, бүкіл әлемге бойынша міндетті үрдіске айналды. Мысал келтіретін болсақ, Кореялық азаматтық құрылыс және құрылыс технологиясы институты (Korea Institute of Science and Technology, KIST) 2013 жылдан бастап барлық жаңа құрылыс нысандарына FBG сенсорларын енгізуді бұйырды. Соңғы 5 жылдықта Инха университеті мен KIST институтының зерттеушілері кәдімгі болат арматураның өзегіне көміртекті талшықты-оптикалық сенсорлары бар металл арқандарын жасау үстінде. Бұл дизайн жоғары созылу беріктігін, беріктігін және деформацияны дәл өлшеуді қамтамасыз етеді (2.14-сурет).



2.14-сурет – ТОС енгізілген болат арқан

Сенсорлық арқандардың ұзақ мерзімді өнімділігін бағалау үшін әрқайсысы 1000 сағаттан астам уақытқа созылған жорғалау және релаксация эксперименттері жүргізілді (2.15-сурет).



2.15-сурет – 1000 сағаттық эксперимент нәтижесі

Эксперименттердің нәтижелері сенсорлық арқандарды нақты әлемде қолдану мүмкіндігін растады және олардың дәстүрлі арқандары сияқты жұмыс істейтінін көрсетті [31].

Қытайлық зерттеушілер Қытай инфрақұрылымының, яғни көпірлер мен биік құрылыстардың жағдайының сенімді бақылауы үшін FBG сенсорларына негізделген жүйені пайдалануға кеңес береді. Зерттеушілердің мақсаты – механикалық, жылу және экологиялық жүктемелерге ұшыраған құрылыс нысандарында қауіпсіздікті арттыру және құрылымдық зақымдануды ерте анықтау. Бақылау жүйесі темірбетон бөлшектерінің композициялық қабаттарына орнатылған FBG сенсорларына негізделген. Сенсорлар бетон аймақтарының ішіне және арматуралық шыбықтарға, сондай-ақ құрылыс барысында басқа алдын ала белгіленген орындарға орналастырылды. Сынақтар үшін Қытай провинцияларындағы көптеген нысандар пайдаланылды, соның ішінде темірбетон қаңқасы бар биік құрылым және орташа ұзындықтағы бетон көпір (2.16-сурет).



а)



ә)

2.16-сурет – Суйфэньхэ қаласының ғимараты (а) және «Куасянь» көпірі (ә)

Әр жағдайда FBG датчиктері құрылыс процесінде де (бетон құю және оны нығайту) және қолданыстағы құрылымдарды жаңарту кезінде де қолданылды. Бірнеше айдан екі жылға дейін созылған бақылау барысында датчиктер компоненттердің деформациялық күйіндегі статикалық және динамикалық өзгерістерді тіркеді. Нәтижелер датчиктердің ерекше сезімталдығы мен тұрақтылығын көрсетті, орташа өлшеу қателігі 1 мкм - ден аз (микродеформациялар), ал механикалық анықтамалық датчиктерден айырмашылығы 2% - дан аз болды. Сондай-ақ, температураны реттеу -10°C -тан $+40^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температурада жақсы жұмыс істейтіні көрсетілген. FBG сенсорлары, әдеттегі сенсорларға қарағанда, қатал жағдайларда және жоғары ылғалдылықта 10 жылдан астам жұмыс істей алатындығы байқалды [32].

3 Эксперименттік нәтижелер

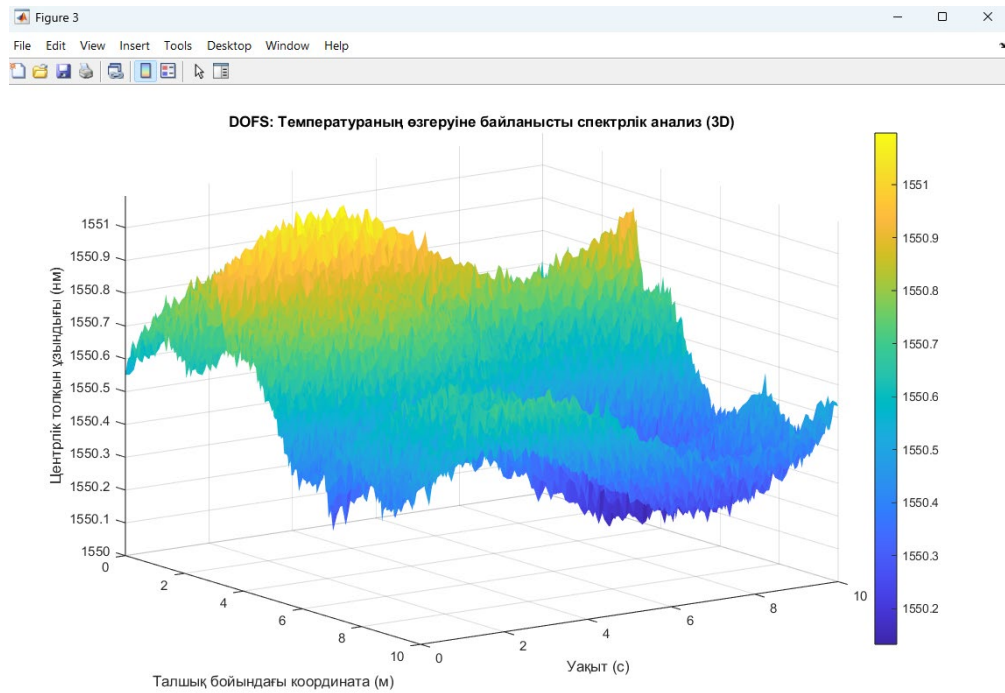
3.1 MatLab бағдарламасы бойынша ТОС-дың температурасына байланысты есептеулер

Бұл бөлімде DOFS және FBG сенсорлары үшін, температуралық әсерлерден туындайтын спектрлік өзгерістерге байланысты MatLab бағдарламасында есептеулер жүргіздім. Төмендегі 3.1-суретте көрсетілген кодтың көмегімен DOFS сенсорларының температуралық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін анықтауға болады.

```
1 %Негізгі мәндер
2 - lambda0 = 1550e-9; % Бастапқы толқын ұзындығы, м
3 - n_eff = 1.468; % Эффективті сыну көрсеткіші
4 - alpha = 8e-6; % Жылулық кеңейу коэффициенті (1/°C)
5 - xi = 10e-6; % Термо-оптикалық коэффициент (1/°C)
6 - L = 10; % Талшықты сенсор ұзындығы, м
7
8 % Талшық бойындағы координата және уақыт шкаласы
9 - z = linspace(0, L, 200); % Талшық бойына дейінгі қашықтық
10 - t = linspace(0, 10, 100); % Уақыт (сағат)
11 - [Z, T] = meshgrid(z, t); % Координата және уақыт бойынша 2D график құру
12
13 % Температура ерісі: координата + уақыт + шу бойынша бөлу
14 - T_base = 20 + 5 * sin(2*pi*z/L) + 3 * sin(6*pi*z/L); % Температураның кеңістікте таралуы
15 - T_peaks = 10 * exp(-(Z - 3).^2/0.1) - 6 * exp(-(Z - 7).^2/0.05); % Жергілікті температура ауытқулары
16 - T_time = 5 * sin(2*pi*t/10); % Температураның уақытта ауытқуы
17 - T_noise = 0.8 * randn(size(Z)); % Кездейсоқ шу
18 - T_total = T_base + T_peaks + T_time + T_noise; % Жалпы температуралық карта
19
20 % Брэгг формуласы арқылы орталық толқын ұзындығының ығысуын есептеу
21 - delta_lambda = lambda0 * (alpha + xi) .* T_total;
22 - lambda_shifted = lambda0 + delta_lambda;
23
24 % Спектрлік анализ бойынша 3D графикін құру
25 - figure('Color', 'w');
26 - surf(Z, T, lambda_shifted * 1e9, 'EdgeColor', 'none'); % Жазықтықты құру
27 - xlabel('Талшық бойындағы координата (м)');
28 - ylabel('Уақыт (с)');
29 - zlabel('Центрлік толқын ұзындығы (нм)');
30 - title('DOFS: Температураның өзгеруіне байланысты спектрлік анализ (3D)');
31 - colorbar;
32 - view(45, 30);
33 - grid on;
```

3.1-сурет – DOFS сенсорларының температуралық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін анықтауға арналған код

Кодты іске қосу арқылы 3 өлшемді графикті аламыз. 3.2 – суреттен көріп тұрғандарыңыздай, бастапқы уақытта температура әсерінен центрлік толқын ұзындығының мәні тура пропорционалды түрде өседі. Уақыт өте келе центрлік толқын ұзындығының мәні төмен түскенін байқай аламыз. Бұл график бетон ерітіндісі құйылу кезіндегі ТОС-ды енгізу әдісіндегі, сенсордың бетонның температуралық өзгерістерін көрсетеді.



3.2-сурет – Спектрлік анализ нәтижесі

Дәл осылай, MatLab бағдарламасында кодты жазу арқылы FBG сенсорларының температуралық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін анықтауға болады (3.3 - сурет).

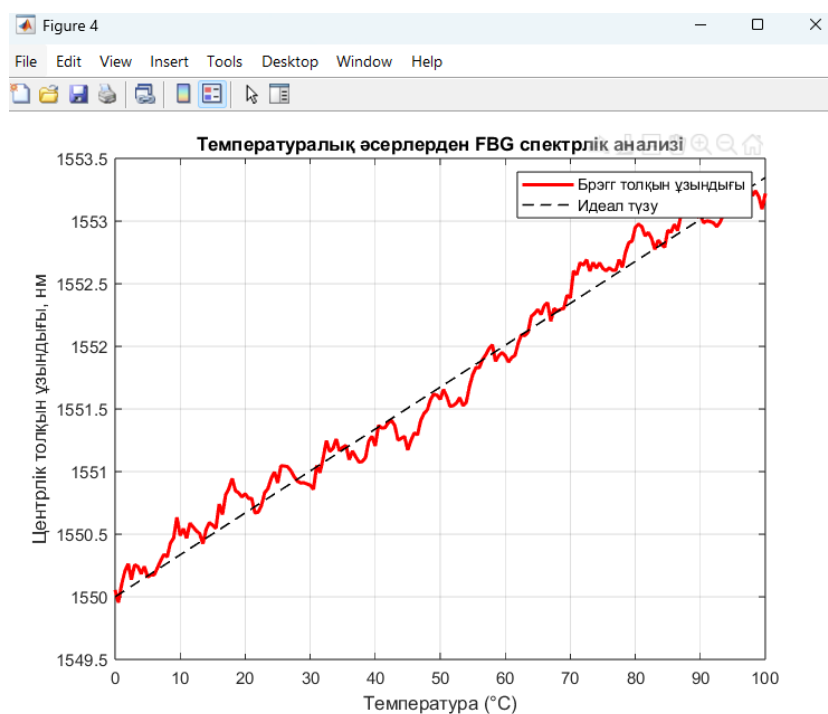
```

1 % Бастапқы мәндер
2 - lambda0 = 1550e-9; % Центрілік FBG толқын ұзындығы (м)
3 - kappa = 0.8; % Шағылысу коэффициенті
4 - n_eff = 1.45; % Эффективті сыну көрсеткіші
5 - alpha = 13e-6; % Температуралық кеңею (1/°C)
6 - xi = 8.6e-6; % Термо-оптикалық коэффициент (1/°C)
7 - L = 10e-3; % Тор ұзындығы (м)
8
9 % Температуралық диапазон
10 - T = 0:0.5:100; % °C
11
12 % Брэгг толқын ұзындығын, температуралық әсердің өзгеруімен есептеу
13 - delta_lambda = lambda0 * (alpha + xi) .* T;
14
15 % Температура мәніне шынайы физикалық әсерлерлерге ұқсатып, қысықтық пен шумды қосу
16 - noise = (randn(size(T)) .* 0.05e-9); % Гаусстық шум
17 - curve = 0.15e-9 * sin(0.1*T) + 0.1e-9 * sin(0.8*T); % Қысықтық
18 - lambda_shifted = lambda0 + delta_lambda + noise + curve; % Ақырғы спектр
19
20 % Графика ті түрғызу
21 - figure('Color','w');
22 - plot(T, lambda_shifted * 1e9, 'r', 'LineWidth', 2);
23 - grid on;
24 - xlabel('Температура (°C)');
25 - ylabel('Центрлік толқын ұзындығы, нм');
26 - title('Температуралық әсерлерден FBG спектрлік анализі');
27 - legend('\lambda_{Bragg} с шумом и флуктуациями');
28
29 % Идеал түзу сызықтан ауытқуды көрсету
30 - hold on;
31 - lambda_ideal = lambda0 + lambda0 * (alpha + xi) .* T;
32 - plot(T, lambda_ideal * 1e9, '--k', 'LineWidth', 1);
33 - legend('Брэгг толқын ұзындығы','Идеал түзу');

```

3.3-сурет – FBG сенсорларының температуралық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін анықтауға арналған код

Ал төмендегі 3.4-суретте көрсетілген графиктен спектрлік өзгеріс байқауға болады. Көріп тұрғандарыңыздай, центрлік толқын ұзындығының мәні температуралық өзгеріске тура пропорционал, демек, бұл есептеулер нәтижесі осыған дейін айтылған теориялық тұжырымдамаларға сай келетінін білдіреді [6].



3.4-сурет – Спектрлік анализ нәтижесі

3.2 MatLab бағдарламасы бойынша ТОС-дың деформациясына байланысты есептеулер

MatLab бағдарламасы бойынша сенсорларының температуралық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін ғана есептеп қоймай, деформациялық әсерлерге байланысты спектрлік өзгеруді де есептедім. Алдымен DOFS сенсорлары үшін деформацияға байланысты есептеулер жүргізілді. Ол үшін келесі беттегі 3.5-суреттегі кодты енгізу қажет. Модельдеу орталық толқын ұзындығы, стандартты мән 1550 нм-ге тең сенсор үшін жасалады. Талшықтың тиімді сыну көрсеткіші $n_{eff} = 1,468$, ал фотоэластикалық коэффициент $p_e = 0,22$. Сенсор 20 м сызықтық жазықтық бойымен орналастырылған.

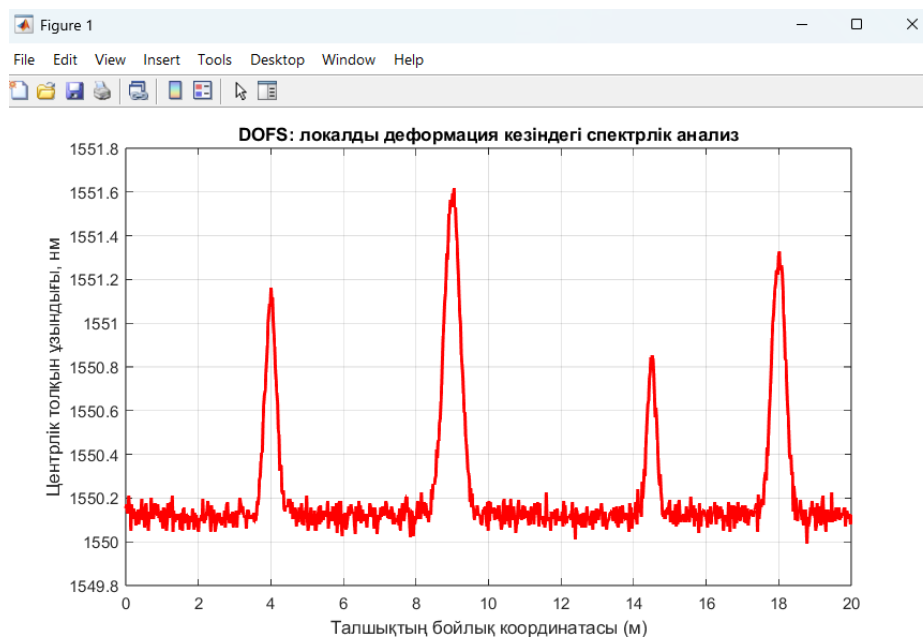
```

1 % Сенсор баптаулары
2 lambda0 = 1550e-9; % Центрілік толқын ұзындығы, м
3 n_eff = 1.468; % Эффективті сыну көрсеткіші
4 p_e = 0.22; % Фотосерпімділік коэффициенті
5
6 % Талшық геометриясы
7 L = 20; % DOFS сенсорының жалпы ұзындығы, м
8 z = linspace(0, L, 1000); % Талшықтың бойлық координатасы
9
10 % Шындық графиктік деформация сценарийі
11 strain_base = 100 * ones(size(z)); % Негізгі фондық мән
12 strain_peaks = ...
13 + 800 * exp(-((z - 4).^2) / 0.05) ... % Бірінші шың
14 + 1200 * exp(-((z - 9).^2) / 0.1) ... % Екінші шың
15 + 600 * exp(-((z - 14.5).^2) / 0.03) ... % Үшінші шың
16 + 1000 * exp(-((z - 18).^2) / 0.07); % Төртінші шың
17
18 strain_noise = 30 * randn(size(z)); % Кішкентай шу
19 strain_total = strain_base + strain_peaks + strain_noise;
20
21 % Салыстырмалы деформацияға аудару
22 strain_relative = strain_total * 1e-6;
23
24 % Брэгг толқын ұзындығының ығысуы
25 delta_lambda = lambda0 * (1 - p_e) .* strain_relative;
26 lambda_shifted = lambda0 + delta_lambda;
27
28 % График: талшық бойындағы спектрлік анализ
29 figure('Color','w');
30 plot(z, lambda_shifted * 1e9, 'r', 'LineWidth', 2);
31 xlabel('Талшықтың бойлық координатасы (м)');
32 ylabel('Центрілік толқын ұзындығы, нм');
33 title('DOFS: локалды деформация кезіндегі спектрлік анализ');
34 grid on;

```

3.5-сурет – DOFS сенсорларының деформациялық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін анықтауға арналған код

Кодты іске қосқаннан кейін центрілік толқын ұзындығының талшықтың бойлық координатасына қатынасты график аламыз. Оны төмендегі 3.6-суреттен айқын көре аласыз.



3.6-сурет – Спектрлік анализ нәтижесі

Мұндай модель DOFS сенсорларының жергілікті механикалық кернеулерге сезімталдығын зерттеуге мүмкіндік береді. Модельдеу бетон конструкцияларында, құбырларда және басқа да кеңейтілген инженерлік нысандарда зақымдануды анықтау алгоритмдерін жасауда пайдалы.

Келесі 3.7-суретте FBG сенсорларына арналған деформациялық әсерлерге байланысты спектрлік өзгеруді есептеуші код жазылған.

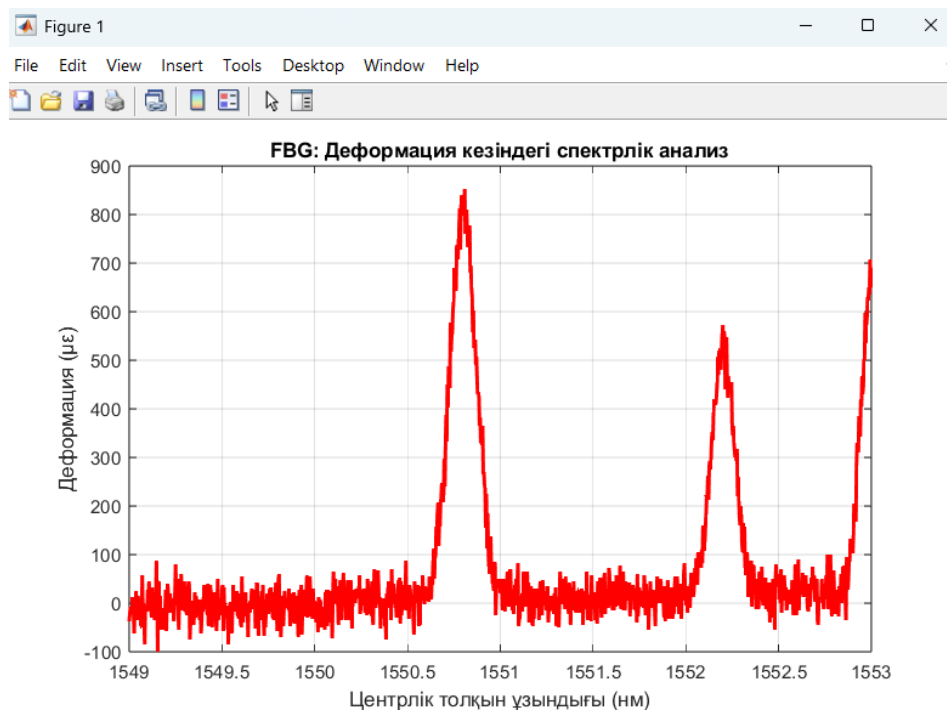
```

1 | % FBG сенсоры үшін негізгі мәндер
2 - | lambda0 = 1550e-9;           % Центрілік толқын ұзындығы, м
3 - | n_eff = 1.468;             % Эффективті сыну көрсеткіші
4 - | p_e = 0.22;              % Фотосерпімділік коэффициенті
5 |
6 | % Толқын ұзындық диапазоны
7 - | lambda = linspace(lambda0 - 1e-9, lambda0 + 3e-9, 1200);
8 |
9 | % FBG теңдеуімен деформацияны кері есептеу
10 - | delta_lambda = lambda - lambda0;
11 - | strain = delta_lambda ./ (lambda0 * (1 - p_e));   % Салыстырмалы деформация
12 - | strain_f = strain * 1e4;                       % Микродеформация (µε)
13 |
14 | % Деформация шыңдарын енгізу
15 - | peak_1 = 800 * exp(-((lambda*1e9 - 1550.8).^2) / 0.01);   % Бірінші шың
16 - | peak_2 = 500 * exp(-((lambda*1e9 - 1552.2).^2) / 0.008); % Екінші шың
17 - | peak_3 = 650 * exp(-((lambda*1e9 - 1553.0).^2) / 0.006); % Үшінші шың
18 - | noise = 30 * randn(size(lambda));                    % Шу
19 |
20 | % Жалпы деформация
21 - | strain_total = strain_f + peak_1 + peak_2 + peak_3 + noise;
22 |
23 | % График құру
24 - | figure('Color','w');
25 - | plot(lambda*1e9, strain_total, 'r', 'LineWidth', 2);
26 - | xlabel('Центрілік толқын ұзындығы (нм)');
27 - | ylabel('Деформация (µε)');
28 - | title('FBG: Деформация кезіндегі спектрлік анализ');
29 - | grid on;

```

3.7-сурет – FBG сенсорларының деформациялық әсерден туындайтын спектрлік өзгерістерін анықтауға арналған код

Бұл код микродеформация жағдайында FBG сенсорларының сандық модельдеуін жүзеге асырады. Яғни, талшықтың бойлық координатасына сыртқы механикалық бұзылулардың әсерінен шағылысқан толқынның орталық ұзындығы қалай өзгередінін зерттеуге мүмкіндік береді. Алынған спектрлік анализ графигі 3.8-суретте көрсетілген.



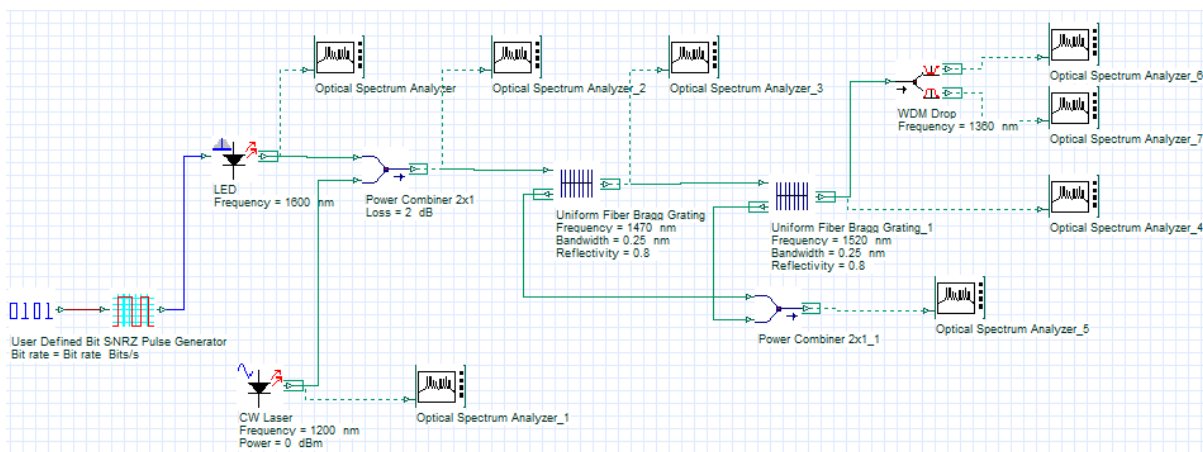
3.8-сурет – Спектрлік анализ нәтижесі

Графиктен көріп тұрғандарыңыздай 1550 нм және 1552 нм толқын ұзындықтарында деформациялық өзгерісті көрінеді. Бұл, сыртқы ортадан көрсетілетін кез-келген әсер шағылысатын жарықтың спектрінің толқын ұзындығына тура пропорционал деген сөз.

MatLab бағдарламасы арқылы компьютерлік модельдеу температура мен деформация параметрлерінің, DOFS және FBG сенсорларының спектрлік қасиеттеріне сәйкес әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Модельдеу күрделі температура мен деформациялық әсерлер, ауытқулар, шың жүктемелері, сызықтық және сызықтық емес деформациялар сияқты бірқатар әсер ету сценарийлерін қолданды.

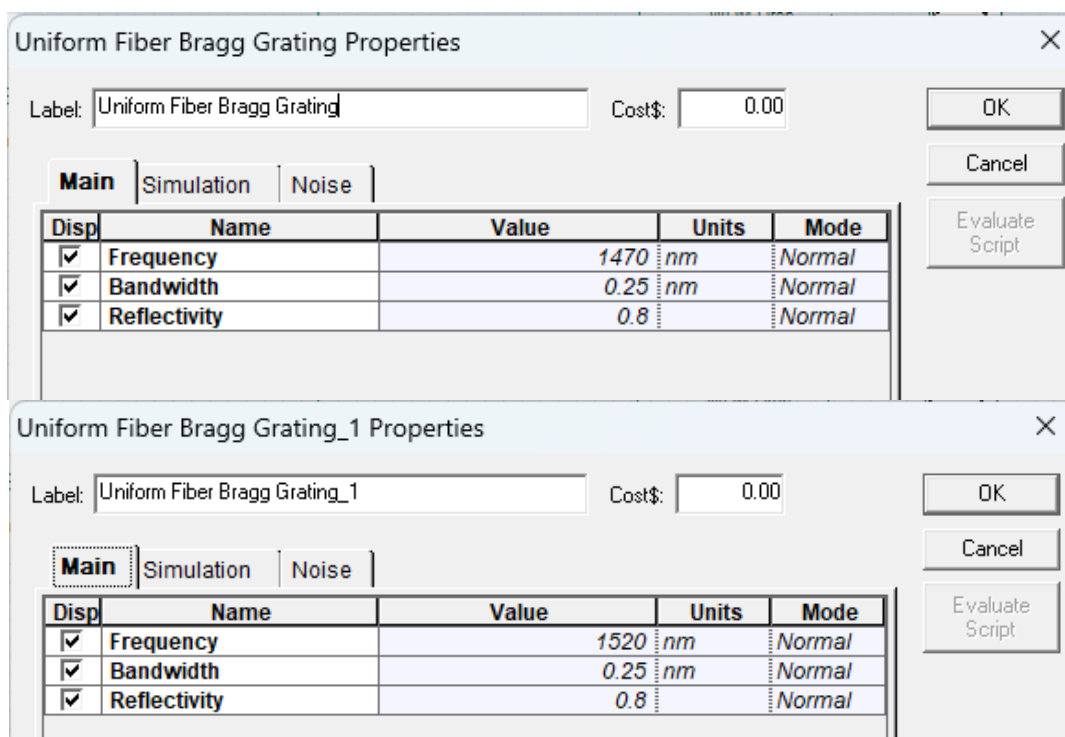
3.3 OptiSystem бағдарламасы арқылы ТОС-ды компьютерлік модельдеу

OptiSystem 7.0 бағдарламасы арқылы талшықты-оптикалық сенсорлардың, дәлірек айтқанда FBG сенсорларының, сұлбасын құру және компьютерлік модельдеу жұмысын атқардым. Модельдеу әр түрлі толқын ұзындығына бейімделген екі FBG сенсорының шағылыстыратын қасиеттерін зерттеуге және олардың мультиплекстеудегі жұмысын зерттеуге бағытталған. Құрылған сұлбаны төмендегі 3.9-суреттен көруге болады:



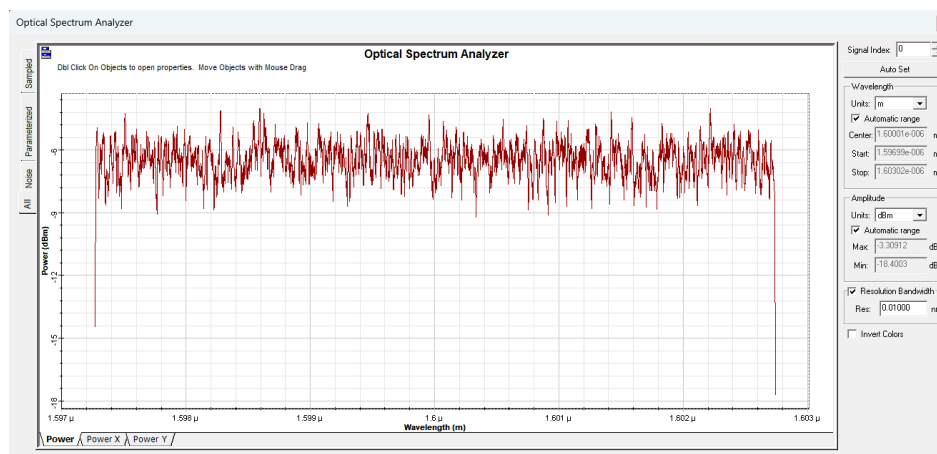
3.9-сурет – OptiSystem бағдарламалық ортасында FBG сенсорларын модельдеу сұлбасы

Сигналдар екі энергия көзінен келеді: CW лазері (Continuous Wave Laser) ($\lambda = 1200$ нм) және жарық диоды (LED) ($\lambda = 1600$ нм). Спектрлік араластыруды қамтамасыз ету және одан әрі сүзу үшін кіріс сигналын жасау үшін олар сигнал жоғалтуы 2 дБ-ге тең оптикалық қосқышпен (Power Combiner 2x1) біріктіріледі. Сигналдың одан әрі өтуі сәйкесінше 1470 нм және 1520 нм толқын ұзындығына реттелген екі каскадты блок, біркелкі FBG (Uniform Fiber Bragg Grating) элементі арқылы жүзеге асырылады, олардың әрқайсысы 0.25 нм өткізу қабілеттілігі және 0.8 шағылысу коэффициентіне реттелген (3.10-сурет).

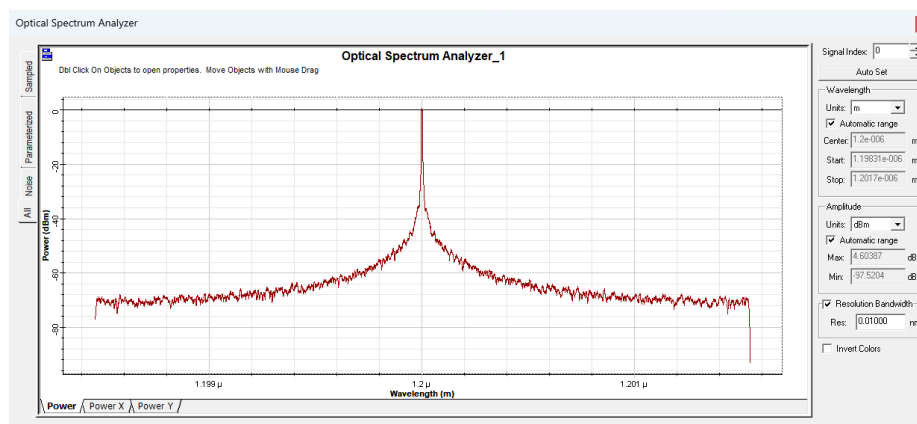


3.10-сурет – Uniform Fiber Bragg Grating элементінің параметрлері

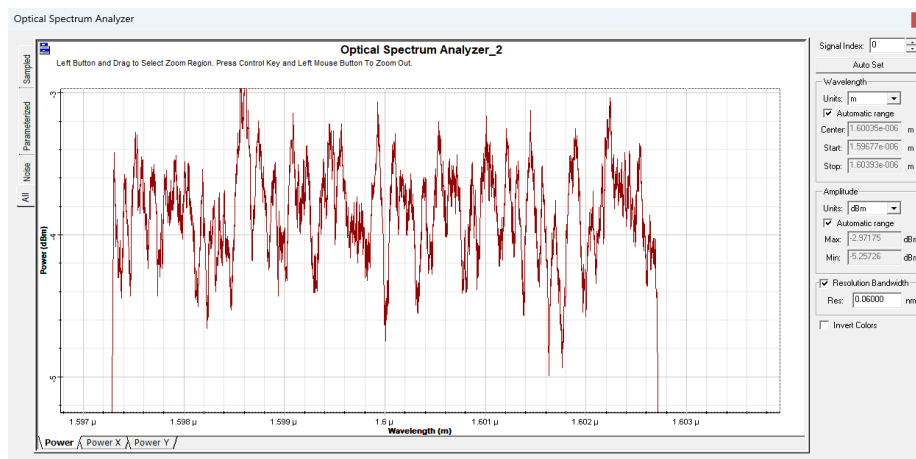
3.9-суреттегі сұлбадан көрініп тұрғандай, FBG сенсорлары белгілі толқын ұзындықтарын спектр анализаторларына қайтарады. Қалған спектрді алу үшін 1380 нм толқын ұзындығында жұмыс жасайтын спектрлік бөлу арқылы мультиплекстеу сүзгісі (WDM Drop, wavelength-division multiplexing drop) қолданылады. Тізбектің әр тармағына жалғанған оптикалық спектрлік анализатордың көмегімен жүйенің әр компонентінің спектрлік нәтижесін анықтауға болады. Анализаторлардан алынған сигнал графиктерін 3.11-17 – суреттерден көруге болады.



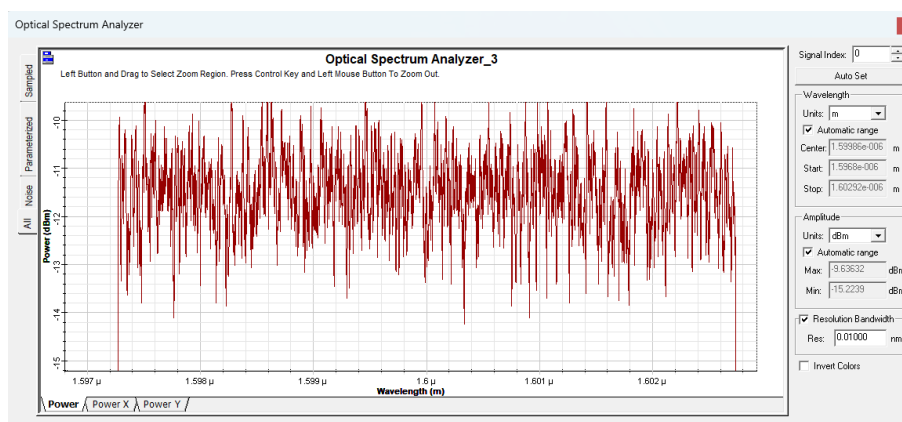
3.11-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері



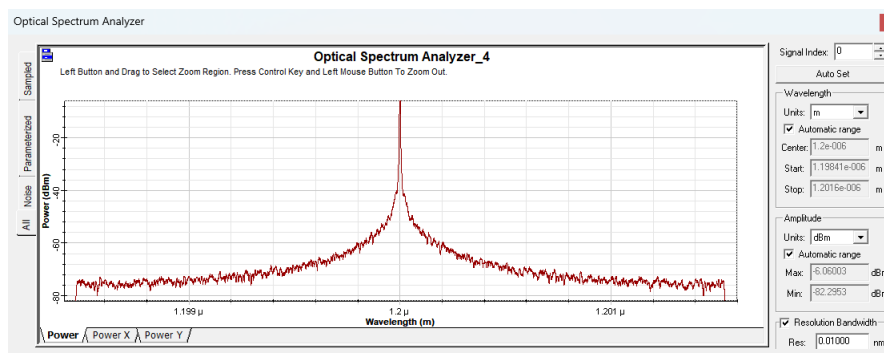
3.12-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері



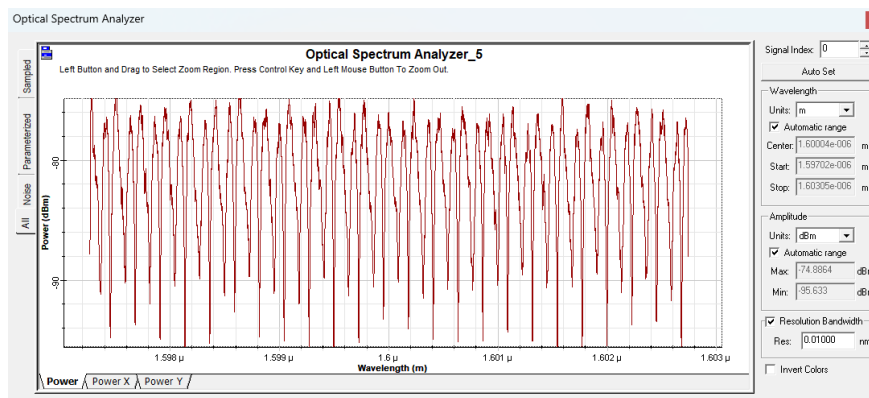
3.13-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері



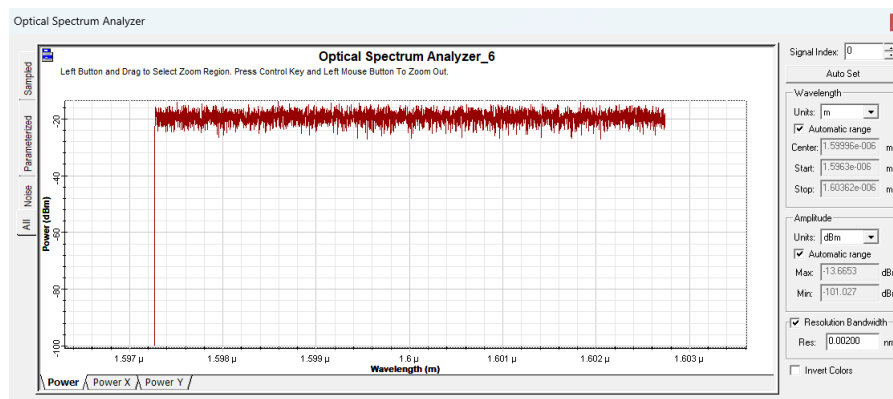
3.14-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері



3.15-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері



3.16-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері



3.17-сурет – Оптикалық анализатор нәтижелері

Құрылған компьютерлік модель талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс жасау принциптерін көрсетеді. Сұлбаның көмегімен FBG сенсорларының механикалық немесе температуралық әсерлеріне байланысты шағылысқан жарық спектрінің толқын ұзындығының өзгеруін байқауға болады. Модельденген сұлбаны құрылыс нысандарының жағдайын бақылау жүйелерін құру үшін негіз ретінде пайдалануға болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл дипломдық жұмыста құрылыс материалдарының құрамына талшықты-оптикалық сенсорларды (ТОС), атап айтқанда таратылған датчиктерді (DOFS) және Брэгг торларына негізделген сенсорларды (FBG) қосу мүмкіндіктері қарастырылды. Оларды бетон конструкцияларына, болат арматуралық және композиттік тоқыма материалдарында қолдану мүмкіндіктеріне ерекше назар аударылды.

MatLab бағдарламасында температура мен деформация параметрлеріне байланысты DOFS және FBG сенсорларының спектрлік анализіне компьютерлік модельдеу жасалды. Сонымен қатар Optisystem 7.0 бағдарламасының көмегімен сыртқы физикалық әсерлерге спектрлік реакцияны модельдейтін FBG сенсорлық сұлбасы модельденді. Сандық талдау нәтижесінде алынған графикалық нәтижелері нақты физикалық құбылыстарды, соның ішінде сызықтық емес әсерлерді, жергілікті шың жүктемелерін және шудың ауытқуын көрсетеді.

Осылайша, атқарылған зерттеу жұмысы құрылыс нысандарын бақылау саласындағы талшықты-оптикалық сенсорлардың өзектілігі мен жоғары ғылыми маңыздылығын растайды. Алынған нәтижелер одан әрі зерттеулерде және азаматтық және өнеркәсіптік құрылыс объектілерінің материалдарының техникалық жай-күйін бақылаудың зияткерлік жүйелерін әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Bado M. F., Casas J. R. A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 5. – С. 1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
- 2 Chen B. et al. Optical fiber sensors in infrastructure monitoring: a comprehensive review //Intelligent Transportation Infrastructure. – 2023. – Т. 2. – С. liad018. <https://doi.org/10.1093/iti/liad018>
- 3 Wu T. et al. Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 16. – С. 4517. <https://doi.org/10.3390/s20164517>
- 4 Kishida K. et al. Distributed optical fiber sensors for monitoring of civil engineering structures //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 12. – С. 4368. <https://doi.org/10.3390/s22124368>
- 5 Thévenaz L. Distributed optical fiber sensors: what is known and what is to come //Frontiers in Sensors. – 2025. – Т. 6. – С. 1546392. <http://dx.doi.org/10.3389/fsens.2025.1546392>
- 6 Alhussein A. N. D. et al. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies //Sensors. – 2025. – Т. 25. – №. 7. – С. 2289. <https://doi.org/10.3390/s25072289>
- 7 Sousa I. et al. Sensing system based on FBG for corrosion monitoring in metallic structures //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 16. – С. 5947. <https://doi.org/10.3390/s22165947>
- 8 Gupta S., Bhatt P. K., Mishra S. Design and simulation of fiber Bragg grating based structural health monitoring system for metal structure //Journal of Optics. – 2024. – С. 1-8. <http://dx.doi.org/10.1007/s12596-024-01799-w>
- 9 Saha S. et al. Machine learning-augmented multi-arrayed fiber bragg grating sensors for enhanced structural health monitoring by discriminating strain and temperature variations //Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2024. – С. 1-22. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-024-00827-4>
- 10 Girei S. H. et al. High sensitivity microfiber interferometer sensor in aqueous solution //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 17. – С. 4713. <https://doi.org/10.3390/s20174713>
- 11 Yao Y., Zhao Z., Tang M. Advances in multicore fiber interferometric sensors //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 7. – С. 3436. <https://doi.org/10.3390/s23073436>
- 12 Zhang S. et al. An optical fiber Fabry–Perot pressure sensor with optimized thin microbubble film shaping for sensitivity enhancement //Coatings. – 2020. – Т. 10. – №. 4. – С. 358. <https://doi.org/10.3390/coatings10040358>
- 13 Cheng X. et al. Silicone rubber based highly sensitive fiber-optic Fabry–Perot interferometric gas pressure sensor //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 17. – С. 4927. <https://doi.org/10.3390/s20174927>
- 14 Nazeri K. et al. Hollow-core photonic crystal fiber Mach–Zehnder interferometer for gas sensing //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 10. – С. 2807.

<https://doi.org/10.3390/s20102807>

15 Guo J. et al. High-temperature measurement of a fiber probe sensor based on the Michelson interferometer //Sensors. – 2021. – T. 22. – №. 1. – C. 289.

<https://doi.org/10.3390/s22010289>

16 Han Y. et al. High-sensitivity high-temperature sensor based on multi-microspheres improved Michelson interferometer //Optics communications. – 2021. – T. 491. – C. 126932. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126932>

17 Qi K. et al. All-fiber high temperature and refractive index sensor based on three microspheres array Michelson interferometer //Optics & Laser Technology. – 2020. – T. 129. – C. 106300. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106300>

18 Qiao H. et al. Fiber optic-based durability monitoring in smart concrete: A state-of-art review //Sensors. – 2023. – T. 23. – №. 18. – C. 7810. <https://doi.org/10.3390/s23187810>

19 Zhao L. et al. Experimental and numerical investigation into corrosion-induced mortar/concrete cracking with distributed optical fiber sensors //Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2022. – T. 12. – №. 4. – C. 943-960. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-022-00589-x>

20 Souza E. et al. Smart Concrete Using Optical Sensors Based on Bragg Gratings Embedded in a Cementitious Mixture: Cure Monitoring and Beam Test //Sensors (Basel, Switzerland). – 2024. – T. 24. – №. 24. – C. 7998. <https://doi.org/10.3390/s24247998>

21 D'Alessandro A., Birgin H. B., Ubertini F. Carbon microfiber-doped smart concrete sensors for strain monitoring in reinforced concrete structures: an experimental study at various scales //Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 16. – C. 6083. <https://doi.org/10.3390/s22166083>

22 Wang Q. et al. Broadband saturable absorption in germanene for mode-locked Yb, Er, and Tm fiber lasers //Nanophotonics. – 2022. – T. 11. – №. 13. – C. 3127-3137. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0161>

23 Zhu X. et al. Inscription and Thermal Stability of Fiber Bragg Gratings in Hydrogen-Loaded Optical Fibers Using a 266 nm Pulsed Laser //Photonics. – MDPI, 2024. – T. 11. – №. 11. – C. 1092. <https://doi.org/10.3390/photonics11111092>

24 Zhang Z. et al. High-efficiency inscription of fiber Bragg grating array with high-energy nanosecond-pulsed laser Talbot interferometer //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 15. – C. 4307. <https://doi.org/10.3390/s20154307>

25 Agliullin T. et al. Overview of addressed fiber Bragg structures' development //Photonics. – MDPI, 2023. – T. 10. – №. 2. – C. 175. <https://doi.org/10.3390/photonics10020175>

26 Wimmer J., Braml T. Investigation of the Robust Integration of Distributed Fibre Optic Sensors in Structural Concrete Components //Sensors. – 2024. – T. 24. – №. 18. – C. 6122. <https://doi.org/10.3390/s24186122>

27 Zhang S. et al. Distributed fiber-optic strain sensing of an innovative reinforced concrete beam–column connection //Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 10. – C. 3957. <https://doi.org/10.3390/s22103957>

28 Alwis L. S. M., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in

textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring: A review //Sensors. – 2021. – T. 21. – №. 15. – C. 4948. <https://doi.org/10.3390/s21154948>

29 Abedin S. et al. Structural health monitoring using a new type of distributed fiber optic smart textiles in combination with optical frequency domain reflectometry (OFDR): Taking a pedestrian bridge as case study //Sensors. – 2023. – T. 23. – №. 3. – C. 1591. <https://doi.org/10.3390/s23031591>

30 Fernandez I., Berrocal C. G., Rempling R. Long-term performance of distributed optical fiber sensors embedded in reinforced concrete beams under sustained deflection and cyclic loading //Sensors. – 2021. – T. 21. – №. 19. – C. 6338. <https://doi.org/10.3390/s21196338>

31 Kim S. T. et al. Analysis of Long-Term Prestress Loss in Prestressed Concrete (PC) Structures Using Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor-Embedded PC Strands //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – №. 24. – C. 12153. <https://doi.org/10.3390/app112412153>

32 Jiang S. F. et al. Structural health monitoring system based on FBG sensing technique for Chinese ancient timber buildings //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 1. – C. 110. <https://doi.org/10.3390/s20010110>

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Әміржанов Баубек Талғатұлы

6B06201 – Телекоммуникация

Тақырыбы: Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу

Әміржанов Баубектің бұл дипломдық жұмысында құрылыс саласында талшықты-оптикалық сенсорларды пайдалану кезіндегі олардың құрылыс материалдарына көрсетілетін әсерлеріне байланысты зерттеулер жүргізілген. Жұмыста сенсорлар арқылы өлшеуге болатын негізгі параметрлер, мысалы, деформация, температура, ылғалдылық, кернеу және құрылыс құрылымдарының басқа физикалық сипаттамалары қарастырылады. Сонымен қатар, олардың классификациясы, артықшылықтары мен кемшіліктерін жан-жақты қарастырған. Одан әрі, сенсорларды енгізу әдістерін көрсетіп, сенсорлар бойынша математикалық модель, құрылымдық сұлба құру және спектральді талдау жұмыстары секілді есептеулер жүргізілген.

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

Ғылыми жетекші

ЭТЖҒТ каф. PhD докторы,
профессор

Н.К.Смайлов.

«20» _____ 2025 ж.

СЫН - ПІКІР
дипломдық жұмыс

Әміржанов Баубек Талғатұлы

6B06201 - Телекоммуникация

Тақырыбы: **Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу**

Орындалды:

- а) графикалық бөлімі 48 бет;
б) түсіндірме жазба 48 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Әміржанов Баубектің дипломдық жұмысы талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеуге арналған. Дипломдық жұмыс төмендегі бөлімдерден тұрады:

Зерттеу жұмысы талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс жасау принципі мен олардың классификациясын зерттеуден басталған. Осылармен қоса сенсорлардың сипаттамасына қарай салыстыру және қолдану салалары жайлы айтылған. Одан әрі талшықты-оптикалық сенсорларға деген ғалымдардың пікірі жазылған. Дипломдық жұмысқа байланысты әдеби шолу жасалынды.

Жұмыстың екінші бөлімінде сенсорлардың жасалу және жазылу әдістемелері, олардың енгізу тәсілдері қарастырылған. Сонымен қатар бөлімде, лабораториялық құрылғының негізінде жазу әдісі кезеңдерімен көрсетілген.

Үшінші бөлімде MatLab бағдарламасы бойынша температуралық және деформациялық әсерлерге байланысты жарық спектрінің ауытқуы есептеулер жүргізілген. Сонымен қатар, OptiSystem бағдарламасында FBG сенсорының жұмыс жасау принципі, сұлбалы түрде көрсетіліп, есептеулер жүргізілген.

Жұмыстың қорытынды бөлімінде талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс саласында қолдану және құрылыс материалдарына көрсетілетін әсерлерге байланысты есептеулерге пікірталас жүргізілген.

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

Жұмыс бағасы

Дипломдық жұмыс 92 деп бағаланды, ал студент Әміржанов Баубек Талғатұлы 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензия беруші

Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті
PhD, зерттеуші профессор

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: Әміржанов Баубек Талғатұлы

Тақырыбы: Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 3.7

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.9

Дәйексөз (35): 0.5

Әріптерді ауыстыру: 0

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:

2025-05-21

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Әміржанов Баубек Талғатұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Талшықты-оптикалық сенсорлардын құрылыс материалдарына әсерін зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 3.7

Коэффициент Подобия 2: 0.9

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 0

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:

2025-05-21

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Әміржанов Баубек Талғатұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Талшықты-оптикалық сенсорлардың құрылыс материалдарына әсерін зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 3.7

Коэффициент Подобия 2: 0.9

Микропробелы: 1

Знаки из других алфавитов: 0

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:

2025-05-21

Дата



Сұңғат Марқсұлы

проверяющий эксперт