

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

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы

«Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-
оптикалық деформация датчиктерін зерттеу»

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

«7М06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

"Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті"
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 681.586.5 (043)

Қолжазба құқығында

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертацияның атауы Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды
талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу
Дайындау бағыты «7М06201 - Телекоммуникация»



Ғылым жетекші
PhD докторы, профессор
Смайлов Н.К.

«10» 01 2025 ж.

Пікір беруші
Energo university,
«Телекоммуникациялық
инженерия» кафедрасының
қауым. профессоры, PhD, т.ғ.к
Ермекбаев М.М.
«13» 12 2024 ж.

Норма бақылаушы
т.ғ.м., оқытушы
К. С. Кенгесбаева С.С.
«09» 01 2025 ж.

ҚОРҒАУТА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТТ кафедр. меңгерушісі
т.ғ.к., қауым. профессор



Е.Таштай
2025 ж.

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 ғарыш технологиялар кафедрасы

«7M06201 – Телекоммуникация»



Магистрлік диссертацияны орындауға

ТАПСЫРМА

Магистрант: Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы

Тақырыбы: «Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу».

Университет ректорының « 04 » 04 2023 ж. № 145-П бұйрығымен бекітілген
Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі: 20. 12 2024 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: MEMCT 59737-20-21 Оптика және фотоника, жалпы техникалық шарттар

Магистрлік диссертацияда әзірлеуге жататын мәселелер тізімі:

- а) Талшықты-оптикалық деформация датчиктері (FODs) және Брэгг торлары арқылы деформацияларды анықтаудың жоғары дәлдігі мен сезімталдығын зерттеу.
- б) Деформациялар мен кернеулерді нақты уақыт режимінде бақылау.
- в) Талшықты Брэгг торларының беріктігі мен төзімділігін тереңінен зерттеу.
- г) Талшықты Брэгг торларының бетонмен өзара әсерін зерттеп, тәжірибелік тексерулер жүргізу.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

Мысалы:

1 Kalizhanova A, Kunelbayev M, Wojcik W, Kozbakova A, Aitkulov Z, Malikova F. Development of Fiber-Optic Sensors System, Based on Fiber Bragg Gratings. Journal of Ecological Engineering. 2022;23(10):98-106. doi:10.12911/22998993/152363.

2 Alfredo Güemes Dpt. Aeronautics, Univ. Politécnica de Madrid Plaza Cardenal Cisneros, 3 MADRID 28040 SPAIN. Fiber Optics Strain Sensors 2019 years.

3 Ramakrishnan, M.; Rajan, G.; Semenova, Y.; Farrell, G. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors* 2018, 16, 99.

4 Chen, J.; Liu, B.; Zhang, H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Front. Optoelectron. China* 2021, 4, 204–212.

5 Hoult N. A., Ekim O., Regier R. Damage/deterioration detection for steel structures using distributed fiber optic strain sensors // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2014. – T. 140. – №. 12. – C. 04014097.

5 Bertulesi, M.; Bignami, D.F.; Boschini, I.; Longoni, M.; Menduni, G.; Morosi, J. Experimental Investigations of Distributed Fiber Optic Sensors for Water Pipeline Monitoring. *Sensors* 2023, 23, 6205.

6 Merzbacher C. I., Kersey A. D., Friebele E. J. Fiber optic sensors in concrete structures: a review // *Smart materials and structures*. – 1996. – T. 5. – №. 2. – C. 196.

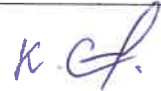
7 Boateng E., Schubel P., Umer R. 2019. Thermal isolation of FBG optical fibre sensors for composite cure monitoring. *Sensors and Actuators A*, 287, 158–167.

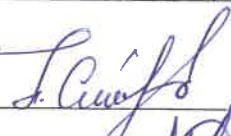
Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Талшықты-оптикалық деформация датчиктері (FODs) және Брэгг торлары арқылы деформацияларды анықтаудың жоғары дәлдігі мен сезімталдығын зерттеу. Әдебиеттерге шолу жасау.	15.01.2023 ж. – 15.09.2023 ж.	орындалды
Деформациялар мен кернеулерді нақты уақыт режимінде бақылау.	15.01.2024 ж. – 14.06.2024 ж.	орындалды
Талшықты Брэгг торларының беріктігі мен төзімділігін тереңінен зерттеу.	17.06.2024 ж. – 15.10.2024 ж.	орындалды
Талшықты Брэгг торларының бетонмен өзара әсерін зерттеп, тәжірибелік тексерулер жүргізу.	16.01.2024 ж. – 20.12.2024 ж.	орындалды

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушының қойған

қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Магистрлік диссертация тақырыбын талдау	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. профессоры, PhD Н.К.Смайлов	10.10.2024 ж.	
Теориялық ақпарат	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. профессоры, PhD Н.К.Смайлов	10.01.2025 ж.	
Норма бақылау	ЭТЖҒТ Т.Ғ.М., оқытушы Кенгесбаева С.С.	09.01.2025 ж.	

Ғылыми жетекшісі PhD докторы  Смайлов Н.К.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды  Ысырайыл Қ.М.

Күні «25» 12 2024 ж.

АНДАТПА

Қазіргі құрылыс саласында құрылыс конструкцияларының күйін бақылау, олардың бұзылуын болдырмау және қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін маңызды. Бұл мақсатта оптикалық деформацияны анықтайтын интеллектуалды датчиктер, Брэгг торлары негізінде жұмыс істейтін перспективті әдіс болып табылады. Бұл датчиктер құрылыс материалдарында, мысалы, бетон мен болатта деформациялар мен кернеулерді дәл және тиімді өлшеуге мүмкіндік береді, бұл үлкен және күрделі объектілер үшін ерекше маңызды. Бұл әдіс жоғары сезімталдық, дәлдік және ұзақ қызмет ету мерзімімен ерекшеленеді, сондықтан ол интеллектуалды мониторинг жүйелерін іске асыруда алмастырылмас құрал болып табылады.

Зерттеу барысында оптикалық датчиктердің жұмыс принциптері, құрылыс конструкцияларындағы өзгерістерді нақты уақыт режимінде анықтау мүмкіндіктері қарастырылып, Брэгг торларының құрылымы, олардың төзімділігі мен материалға әсері талданады. Алынған нәтижелер құрылыс объектілерінің қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігін арттыруға ықпал етеді, өйткені олар конструкциялардың күйіндегі сындарлы өзгерістерді уақытында анықтауға мүмкіндік береді.

АННОТАЦИЯ

В современной строительной отрасли важно контролировать состояние строительных конструкций, предотвращать их разрушение и обеспечивать безопасность. С этой целью интеллектуальные датчики обнаружения оптической деформации являются многообещающим методом, работающим на основе решеток Брэгга. Эти датчики позволяют точно и эффективно измерять деформации и напряжения в строительных материалах, таких как бетон и сталь, что особенно важно для больших и сложных объектов. Этот метод отличается высокой чувствительностью, точностью и длительным сроком службы, поэтому является незаменимым инструментом при реализации интеллектуальных систем мониторинга.

В ходе исследования были рассмотрены принципы работы оптических датчиков, возможности обнаружения изменений в строительных конструкциях в режиме реального времени, проанализированы структура решеток Брэгга, их стойкость и влияние на материал. Полученные результаты способствуют повышению безопасности и долговечности строительных объектов, поскольку позволяют своевременно выявлять конструктивные изменения в состоянии конструкций.

ANNOTATION

In the modern construction industry, it is important to monitor the condition of building structures, prevent their destruction and ensure safety. To this end, intelligent optical strain detection sensors are a promising method based on Bragg gratings. These sensors allow accurate and efficient measurement of deformations and stresses in building materials such as concrete and steel, which is especially important for large and complex objects. This method is characterized by high sensitivity, accuracy and long service life, therefore it is an indispensable tool in the implementation of intelligent monitoring systems.

During the study, the principles of operation of optical sensors, the possibility of detecting changes in building structures in real time were considered, the structure of Bragg gratings, their durability and effect on the material were analyzed. The results obtained contribute to improving the safety and durability of construction facilities, since they allow timely identification of structural changes in the condition of structures.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	7
1 Оптикалық байланыс технологиясының эволюциясы	10
1.1 Заманауи оптикалық талшықтар мен сенсорлар	13
1.2 Брэгг торларының тарихы мен олардың даму кезеңдері	28
1.3 Қолданыстағы деформацияны бақылау тәсілдеріне жалпы шолу	31
1.4 Талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс істеу принципі	33
1.5 Құрылыс индустриясындағы Брэгг торлары, оларды қолдану және орнату әдістемесі	37
2 Брэгг торларын орнату және бетон конструкцияларына интеграциялау әдістері	39
2.1 Бетон конструкцияларының деформацияға ұшырау себептері мен жағдайлары	41
2.2 Құрылымдарда қолданылатын сенсорлардың ерекшеліктері	41
3 Талшықты Брэгг торларын бетон конструкцияларын бақылауда қолдану	47
3.1 Брэгг торларының визуализациялау мүмкіндіктері және өлшеу дәлдігі мен сенімділігін бағалау	49
3.2 Мониторинг нәтижелерінің құрылымдар жұмысындағы маңызы мен қауіпсіздік аспектілері	50
3.3 Зерттеу жүргізу барысында деформацияларды өлшеудің нәтижелері	52
3.4 Зерттеу бағыттарына ұсыныстар және компьютерлік модельдер	54
Қорытынды	
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта бетон конструкцияларының құрылысындағы және қызмет көрсетуіндегі маңызы зор. Бұл құрылымдар, мысалы, көпірлер, ғимараттар, бөгеттер, сондай-ақ басқа да бетоннан жасалған нысандар, қалалар мен көлік инфрақұрылымының негізгі бөліктері болып табылады. Олардың сенімділігі мен ұзақ мерзімділігі аймақтың қауіпсіздігі мен экономикалық тұрақтылығына тікелей әсер етеді. Сондықтан инженерлер мен зерттеушілер үшін бетон конструкцияларының жағдайын бақылау және олардың деформацияларын ертерек анықтау басты міндет болып қала береді.

Қазіргі заманғы технологиялар мен әдістер бетон конструкцияларының күйін тиімді бақылауға мүмкіндік береді. Олардың ішінде ең тиімді тәсілдердің бірі – талшықты-оптикалық сенсорлар мен Брэгг торларын қолдану. Бұл жүйелер нақты уақыт режимінде жоғары дәлдікпен жұмыс істейді және құрылымдардың жағдайын үнемі бақылап отыруға мүмкіндік береді. Брэгг торлары арқылы бетондағы деформацияларды дәл анықтау инженерлерге құрылымның қызмет ету мерзімін ұзарту және кез келген ақауларды уақытында жөндеу үшін маңызды ақпарат береді.

Талшықты-оптикалық сенсорлар өздерінің жеңіл салмағы, электромагниттік әсерлерге төзімділігі мен күрделі ортада жұмыс істеу қабілетімен ерекшеленеді. Брэгг торлары талшықтың бойында шағылыстың толқынының өзгеруін бақылап, нақты уақыттағы кернеу мен температура өзгерістерін анықтайды. Осы технологияларды пайдалану арқылы бетон конструкцияларындағы деформацияларды немесе ақауларды ертерек байқауға болады, бұл уақытында жөндеу жұмыстарын жүргізуге мүмкіндік береді.

Бұл бақылау жүйелері құрылымдардың ұзақ мерзімді қызметін қамтамасыз етуге ғана емес, олардың қауіпсіздік деңгейін арттыруға да ықпал етеді. Мұндай жүйелер аймақтардың экономикалық және әлеуметтік тұрақтылығына оң әсер етеді, себебі олар құрылымдық апаттардың алдын алу мен олардың тиімділігін қамтамасыз етеді. Талшықты-оптикалық технологиялар қазіргі таңда бетон конструкцияларын бақылауда ең тиімді құралдардың бірі болып саналады. Болашақта бұл технологиялардың қолдану аясы кеңейіп, басқа салаларда да кеңінен қолданыла алады. Қазіргі уақытта жаңа ғимараттардың құрылысы қарқынды жүргізілуде. Кейбір жағдайларда құрылыс технологиясының бұзылуы орын алуы мүмкін, топырақ эрозиясы болуы мүмкін, ғимаратты немесе құрылысты пайдалануға бергеннен кейін іргетастағы және жүк көтергіш конструкциялардағы жарықтардың пайда болуына байланысты жағдай туындауы мүмкін [1, 2, 3].

Талшықты-оптикалық сенсорлар оптикалық талшық арқылы өтетін жарықтың қарқындылығының өзгерісін тіркеп, бетон конструкцияларындағы деформацияларды дәл анықтайды. Бұл сенсорлар құрылымның күйін үздіксіз бақылауға мүмкіндік береді, себебі олар тіпті ең аз өзгерістерді де анықтай алады. Брэгг торлары – бұл жүйенің маңызды құрамдас бөлігі. Олар

талшықтың ұзындығының өзгерісін өлшеу арқылы деректердің жоғары дәлдігі мен сенімділігін қамтамасыз етеді. Брэгг торлары құрылымдағы температура мен кернеу өзгерістерін нақты уақыт режимінде тіркеп, оларды талдауға мүмкіндік береді.

Бұл жүйелер бетон конструкцияларындағы ықтимал ақауларды ерте анықтауға көмектеседі, осылайша төтенше жағдайлардың алдын алу және инфрақұрылымның сенімділігін арттыру мүмкіндігін береді. Деформацияларды ертерек анықтау құрылымдардың ұзақ мерзімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады.

Талшықты-оптикалық бақылау жүйелері құрылымдардың қызмет ету мерзімін ұзартады, өйткені олар нақты уақыттағы жоғары дәлдікпен және тұрақтылықпен жұмыс істейді. Бұл жүйелер жөндеу және техникалық қызмет көрсету жұмыстарын уақытында жүргізуге мүмкіндік береді, нәтижесінде шығындар азайып, инфрақұрылымның тиімділігі артады. Қалалардың тұрақты дамуы мен халық санының өсуі жағдайында талшықты-оптикалық сенсорлар қоғамдық қауіпсіздікті қамтамасыз ету және тұрғындардың өмір сапасын жақсарту үшін маңызды рөл атқарады [4].

Бетон конструкцияларының күйін бақылауда ең заманауи әдістердің бірі - Брэгг торларын қолданатын талшықты-оптикалық сенсорлар болып табылады. Бұл технологиялар құрылымдағы деформацияларды нақты уақыт режимінде жоғары дәлдікпен және сенімділікпен тіркейді, бұл құрылымдардың қауіпсіздігін арттырады. Механикалық тензометрлермен салыстырғанда талшықты-оптикалық сенсорлар бірнеше артықшылықтарға ие: олар жоғары сезімталдығымен, ұзақ қызмет ету мерзімімен ерекшеленеді және бетон құрылымымен біріктірілгенде оның тұтастығын бұзбайды. Бұл технологиялар бетон құрылымдарын бақылаудағы тиімді құрал ретінде кеңінен қолданыс табуда, әрі болашақта осы саладағы зерттеулер жаңа жетістіктерге жетуі мүмкін.

Оптикалық талшық ғимараттың конструкциясында 50 жылдан астам уақыт бойы сақталып, жарық толқыны арқылы ақпаратты едәуір қашықтыққа жеткізе алады. Темірбетон іргетасының көп бөлігі жер астында жасырылғандықтан, оның зақымдалған жерлерін визуалды тексеру немесе бұзбайтын бақылау әдістерімен анықтау әрдайым мүмкін бола бермейді. Бұл құрылыс саласында диагностика мен бақылаудың жаңа құралдарын әзірлеп жатқан ғалымдар мен әзірлеушілер үшін өте маңызды міндет болып табылады. Монолитті темірбетон ғимарат конструкцияларындағы жарықшақтар [5–7] қауіпті, себебі олардың өсуі мен ашылуын бақылаусыз қалдыру конструкцияның нақты техникалық жағдайы туралы ақпараттың жоқтығына әкеледі, ал мұндай конструкцияларды пайдаланудың салдары өте ауыр болуы мүмкін.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты: Бетон конструкцияларының деформацияларын бақылау мен талдау үшін талшықты Брэгг торлары негізінде жұмыс істейтін талшықты-оптикалық сенсорлардың тұжырымдамасын әзірлеу және олардың қолдану аясын зерттеу. Зерттеу

барысында заманауи бақылау технологияларының тиімділігі бағаланып, нақты объектілерде қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Бұл тақырып құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету және олардың ұзақ мерзімділігін арттыру тұрғысынан өте маңызды.

Зерттеу жұмысының жаңалығы: Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс принциптері мен артықшылықтары зерттеліп, оларды нақты құрылыс конструкцияларында қолдану бойынша тәжірибелік зерттеулер жүргізілді. Жұмыста алғаш рет құрылыс конструкцияларының деформациясын өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің интеллектуалды алгоритмдері әзірленіп, құрылыс саласына қолдану мүмкіндіктері ұсынылды.

Зерттеу жұмысының өзектілігі: Құрылыс конструкцияларының беріктігі мен сенімділігі – қоғамның қауіпсіздігі мен инфрақұрылымның ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ететін маңызды факторлардың бірі. Қазіргі заманғы құрылыс материалдарының күрделілігі мен олардың пайдалану шарттарының әртүрлілігі конструкциялардың деформациясы мен кернеуін жоғары дәлдікпен бақылауды талап етеді. Дәстүрлі бақылау әдістері (механикалық датчиктер, визуалды инспекциялар) жиі жоғары қателікке, шектеулі сенімділікке және пайдалану шығындарының көптігіне ие. Бұл ретте, талшықты-оптикалық деформация датчиктері жаңа буын технологиясы ретінде ерекшеленеді.

Зерттеуге бағытталған мәселелер: Құрылыс конструкцияларының деформациясын және кернеуін дәл бақылау заманауи құрылыс индустриясында маңызды міндет болып табылады. Дәстүрлі әдістердің дәлдігі жеткіліксіз және кейбір жағдайларда құрылыс объектілерінің нақты жағдайын көрсетпейді; Талшықты-оптикалық датчиктердің сенімділігі мен функционалдығын арттыру үшін оларды құрылыс материалдарына бейімдеу және олардың ұзақ мерзімді жұмысын қамтамасыз ету тәсілдерін анықтау қажеттілігі туындайды; Жаңа технологияларды енгізу кезінде олардың коммерциялық тұрғыда қолжетімді болуы маңызды. Бұл талшықты-оптикалық датчиктердің қолданысын кеңейту үшін маңызды шарт.

Зерттеуге бағытталған тапсырмалар: Брэгг торлары арқылы деформацияларды анықтаудың жоғары дәлдігі мен сезімталдығын анықтау үшін ғылыми әдебиеттерге терең шолу жүргізу; Деректерді үздіксіз жинау және талдаудың тиімді алгоритмдерін жасап, оларды құрылыс конструкцияларына бейімдеу; Бетон конструкцияларымен интеграцияланған Брэгг торларының механикалық және физикалық сипаттамаларын зерттеу үшін тәжірибелік тексерулер жүргізу; Талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану үшін қолданыстағы стандарттар мен регламенттерді зерттеп, оларды жетілдіру бойынша ұсыныстар беру.

1 Оптикалық байланыс технологиясының эволюциясы

Оптикалық байланыстың дамуы адамзаттың жарық арқылы ақпарат жеткізу идеясына негізделген. Ежелгі дәуірде бұл байланыс түрі түтін, алау және күн сәулесін пайдалану сияқты қарапайым әдістерден бастау алды. Мұндай тәсілдер алыс қашықтықта қарапайым сигналдарды беру үшін қолданылғанымен, олар шектеулі және сенімділігі төмен еді.

XIX ғасырда оптикалық байланыс жаңа деңгейге көтерілді. Ғалымдар жарықтың қасиеттерін зерттеп, оны ақпарат жеткізудің тиімді құралына айналдыру жолында тәжірибелер жүргізді. Осы кезеңде оптикалық телеграф жүйелері пайда болды. Олар жарық сигналдары арқылы кодталған хабарламаларды жеткізуді қамтамасыз етті. Бұл жүйелер ақпарат алмасу жылдамдығы мен дәлдігін арттырып, коммуникация саласындағы ірі жаңалықтардың бірі болды.

XX ғасырда талшықты-оптикалық технологиялар оптикалық байланыстың дамуында жаңа серпіліс жасады. Жарық толқындарын талшықтар арқылы жеткізу идеясы іске асырылып, үлкен қашықтықтарға жоғары жылдамдықты сигналдарды жоғалтусыз жеткізуге мүмкіндік туды. Бұл технология деректердің өткізу қабілетін едәуір арттырды және оны заманауи байланыс жүйелерінің негізіне айналдырды.

XXI ғасырдың басында интернеттің қарқынды дамуы оптикалық байланыстарды жаһандық коммуникацияның ажырамас бөлігіне айналдырды. Қазіргі таңда оптикалық желілер деректерді қауіпсіз әрі жылдам жеткізудің маңызды құралы болып табылады. Сонымен қатар, кванттық ақпаратты беру бағытындағы зерттеулер оптикалық технологиялардың жаңа мүмкіндіктерін ашуда.

Оптикалық байланыстың әрбір даму кезеңі ғылыми-технологиялық жетістіктерге негізделіп, ақпараттық қоғамның қалыптасуына елеулі үлес қосты. Бұл сала болашақта да жаңа инновацияларды дамытуға мүмкіндік береді.

Оптикалық байланыстың эволюциясы технологиялық инновациялар мен ғылыми жетістіктердің ақпарат алмасу әдістерін түбегейлі өзгерткен тамаша мысалдарының бірі болып табылады. Оның дамуы ежелгі дәуірден бастап қазіргі заманғы талшықты-оптикалық желілерде қолданылатын озық технологияларға дейін бірнеше маңызды кезеңдерден өтті.

Жарық арқылы ақпаратты беру идеясы адамзат тарихында ерте заманнан-ақ пайда болған. Ежелгі дәуірде адамдар алыс қашықтықта байланысу үшін түтін, алау және жарық сигналдарын қолданды. Бұл тәсілдер деректерді жеткізу үшін жарықты қолданудың алғашқы қадамдары еді. Мұндай әдістерді қолдану, негізінен, қарапайым болса да, сол кездегі байланыс қажеттіліктерін қанағаттандырды.

Уақыт өте келе оптикалық байланысты дамытудағы жетістіктерге ғылым мен технологияның дамуы себеп болды. XVII ғасырда жарықтың табиғаты мен оның қасиеттерін зерттеу бойынша алғашқы ғылыми жұмыстар

жүргізілді, бұл болашақта оптикалық сигналдарды қолдану мүмкіндіктерін кеңейтті. XIX ғасырда оптикалық телеграфтар қолданыла бастады, бұл байланыс жүйесін айтарлықтай жаңғыртуға мүмкіндік берді.

XX ғасырдың екінші жартысында талшықты-оптикалық байланыс технологиясының пайда болуы оптикалық байланыстың дамуындағы ең ірі серпілістердің бірі болды. Жарықты ақпарат тасымалдаушы ретінде пайдалану идеясы талшықты-оптикалық кабельдердің ойлап табылуымен жаңа деңгейге көтерілді. Бұл технология деректерді үлкен қашықтықтарға жоғары жылдамдықпен және аз шығынмен жеткізуге мүмкіндік береді.

Қазіргі таңда оптикалық байланыс жүйелері жоғары өткізу қабілеті мен сенімділігі арқасында телекоммуникацияның маңызды бөлігіне айналды. Бұл технологияның эволюциясы ақпарат алмасу тәсілін түбегейлі өзгертті және болашақта оның дамуы жаңа мүмкіндіктерге жол ашады деп күтілуде.

XIX ғасырда ғалымдар ақпаратты жеткізу үшін оптикалық технологияларды қолданудың алғашқы тәжірибелерін жасай бастады. Мұндай әдістердің бірі айна мен күн сәулесін пайдалану арқылы хабарламаларды алыс қашықтыққа жіберу болды. Бұл тәсілдер жарықтың ақпарат тасымалдаушы ретінде қолданылу мүмкіндіктерін зерттеудегі алғашқы қадамдардың бірі болды.

XIX ғасырдың соңына қарай оптикалық телеграф жүйелері пайда болды, олар арнайы оптикалық түтіктер арқылы жарық сигналдарының көмегімен кодталған хабарламаларды жеткізуге мүмкіндік берді. Бұл жаңалық оптикалық байланыстың дамуына маңызды үлес қосты және ақпаратты беру жүйелерін жетілдіруге айтарлықтай әсер етті. Бұл жүйелер салыстырмалы түрде қарапайым болғанымен, сол кезеңде ұзақ қашықтыққа ақпарат жеткізудің тиімді құралы ретінде танылды.

XX ғасырдың екінші жартысы оптикалық байланыс технологиясы үшін серпінді кезең болды. Осы уақытта талшықты-оптикалық кабельдердің жасалуы оптикалық байланысты жаңа деңгейге көтерді. Бұл технология жарықты ақпарат тасымалдаушы ретінде тиімді пайдалануға мүмкіндік беріп, деректерді үлкен қашықтықтарға жылдам әрі аз шығынмен жеткізуді қамтамасыз етті. Талшықты-оптикалық жүйелердің бұл ерекшеліктері оларды дәстүрлі кабельдік жүйелерге қарағанда тартымды балама етті.

Қазіргі уақытта талшықты-оптикалық байланыс технологиялары телекоммуникацияның маңызды бөлігіне айналды. Олар жоғары өткізу қабілеттілігі мен сенімділігі арқасында ақпарат алмасуда жетекші рөл атқарады. Оптикалық технологиялардың бұл эволюциясы деректерді жылдам әрі тиімді жеткізудің заманауи талаптарын қанағаттандырып, ғылым мен техниканың дамуына жаңа мүмкіндіктер ашты.

Талшықты-оптикалық желілердің қазіргі дамуы технологиялық жетістіктер мен жаңа материалдардың пайда болуымен тығыз байланысты. Бұл байланыс түрі соңғы жылдары кең таралып, өзінің жоғары тиімділігімен танымал болды. Қазіргі талшықты-оптикалық желілер алыс қашықтықтарға

үлкен көлемдегі деректерді жоғары жылдамдықпен беруді қамтамасыз ете отырып, жаһандық коммуникация жүйелерінің негізіне айналды.

XX ғасырдың соңында талшықты-оптикалық технологиялар айтарлықтай серпіліс жасады. Осы кезеңде WDM (Wave Division Multiplexing) және EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) жүйелерінің дамуы оптикалық байланысқа жаңа мүмкіндіктер әкелді. WDM технологиясы бір талшық арқылы бірнеше жарық толқындарын беру арқылы өткізу қабілетін едәуір арттырды. Бұл әдіс үлкен деректер көлемін бір уақытта және үлкен жылдамдықпен тасымалдауға мүмкіндік берді. Ал EDFA жүйесі талшықты-оптикалық желілердің сигналдарын қашықтыққа жеткізуде маңызды рөл атқарды. Бұл күшейткіштер сигналдың сапасын жоғалтпай, ұзақ қашықтықтарға жеткізілуін қамтамасыз етті.

Осы технологиялық жетістіктердің арқасында талшықты-оптикалық байланыс жүйелері тек телекоммуникация саласында ғана емес, сонымен қатар деректер орталықтары, бұлттық қызметтер және сандық экономика үшін маңызды инфрақұрылымға айналды. Бұл жүйелердің жоғары сенімділігі, энергия тиімділігі және үлкен өткізу қабілеті оларды жаһандық байланыс қажеттіліктерін қанағаттандырудың ең тиімді шешімдерінің бірі етеді.

Қорыта айтқанда, WDM және EDFA технологияларының енгізілуі талшықты-оптикалық жүйелердің жаңа деңгейге көтерілуіне ықпал етті. Бұл технологиялар қазіргі заманғы ақпараттық қоғамның талаптарына жауап беретін байланыс жүйелерін құруға мүмкіндік берді және болашақта олардың маңызы одан әрі арта түседі деп күтілуде [8].

XXI ғасырдың басы интернет пен оптикалық желілер дәуірінің басталуымен ерекшеленді. Интернеттің қарқынды дамуы оптикалық байланыстарды жаһандық коммуникациялық инфрақұрылымның ажырамас бөлігіне айналдырды. Көптеген провайдерлер жоғары жылдамдықты интернетке қолжетімділікті қамтамасыз ету үшін оптикалық желілерді белсенді түрде енгізе бастады. Бұл технология ақпарат беру жылдамдығы мен сапасын жаңа деңгейге көтерді, осылайша заманауи цифрлық қоғамның қажеттіліктерін қанағаттандырды.

Темірбетон және тас конструкцияларындағы ақауларды анықтау үшін бұзбайтын бақылау әдістері белгілі. Темірбетон конструкцияларын ультрадыбыстық құрылымдық зондтау – ақауларды анықтау әдістерінің бірі. Бұл әдістің принципі конструкциядағы ақаулар мен оның бөліктерінен шағылысқан эхосигналдарды талдауға негізделген [9, 10].

Темірбетон және тас конструкциялардың беріктігін бұзбай тексеру әдістерінің қатарына георадарды қолдану жатады [10, 11]. Бетонның беріктігін анықтау үшін қолданылатын тағы бір құрал – Шмидт балғасы, ол беткі қаттылықты өлшеуге арналған құрылғы [12, 14]. Бетонның сығымдауға беріктігі мен балға серпілісінің арасындағы тәуелділікті біле отырып, бетонның беріктік параметрін бағалауға болады. Алайда, [15] зерттеуінде авторлар Шмидт балғасының бетонның беріктігін дәл және тікелей бағалай алмайтынын атап өтеді.

[16] зерттеуде SHM-X жарықшақ өлшегішін және классикалық геодезиялық әдісті қолдану ұсынылады. [17] жұмыста жарықшақтарды анықтауды жақсарту үшін LiDAR және деректердің оңтайлы жиынтығы әдісін пайдалану көрсетілген. Маңызды жайт – бұзбайтын бақылау құралдары арқылы тек мерзімді тексерулер жүргізуге болады, ал қызметтердің құны жоғары, себебі олармен тек арнайы оқытылған мамандар ғана жұмыс істей алады [18–23].

Бүгінгі таңда оптикалық байланыстың даму перспективалары жаңа мүмкіндіктер ашуда. Кванттық ақпаратты беру үшін оптикалық сигналдарды пайдалану бағытында зерттеулер белсенді түрде жүргізілуде. Бұл жаңа технология деректерді қауіпсіз жеткізуге және тиімді байланыс жүйелерін құруға негіз болады. Кванттық оптикалық байланыстар шифрлау мен деректерді қорғаудың жаңа деңгейін қамтамасыз ете отырып, болашақ коммуникация жүйелерінің негізгі элементтерінің бірі болмақ.

Оптикалық байланыстарды дамыту кезеңдері адамзаттың ақпарат алмасу тәсілдерін жетілдіруге деген тұрақты ұмтылысын айқын көрсетеді. Оптикалық технологиялардың эволюциясы адамдар арасындағы байланысты жеңілдетіп қана қоймай, әлеммен өзара әрекеттесудің шекараларын кеңейтті.

Қазіргі оптикалық желілердің жоғары жылдамдығы, сенімділігі және өткізу қабілеті интернеттің дамуына серпін беріп, жаһандық ақпараттық инфрақұрылымды қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, кванттық технологиялар негізіндегі оптикалық байланыстардың болашақтағы дамуы жаңа инновациялық шешімдерге жол ашады. Осылайша, оптикалық технологиялардың әр кезеңі адамзаттың технологиялық жетістіктерге қол жеткізуіне және әлемдік байланыстарды нығайтуға ықпал етуде.

1.1 Заманауи оптикалық талшықтар мен сенсорлар

Заманауи оптикалық талшықтар мен сенсорлар телекоммуникация, медицина, өнеркәсіп және ғылыми зерттеулер сияқты әртүрлі салаларда кең қолданысқа ие. Олардың басты артықшылықтары – жоғары сезімталдық, шағын өлшемдер, электромагниттік әсерлерге төзімділік және күрделі ортада жұмыс істеу қабілеті. Бұл технологиялар ақпаратты тасымалдау мен қоршаған ортаның өзгерістерін дәл бақылау саласында жаңа мүмкіндіктер ашады.

Оптикалық талшықтардың құрылымы мен түрлері ерекше маңызды. Олар, негізінен, диаметрі адам шашынан жұқа болатын шыны немесе пластик материалдардан жасалған. Әрбір талшық үш негізгі қабаттан тұрады. Ең ішкі бөлігі – ядро (core), ол жарықты бағыттауға және өткізуге жауапты. Ядроның айналасындағы қаптама (cladding) жарықтың сыртқа шығып кетуіне жол бермей, оны ядро ішінде ұстап тұрады. Ал сыртқы қорғаныс қабаты (buffer coating) талшықты механикалық әсерлерден және сыртқы зақымданулардан сақтайды.

Бұл талшықтар ақпараттық технологиялар мен сезгіш құрылғыларды дамытуда маңызды рөл атқарады. Олардың жоғары дәлдігі мен сенімділігі көптеген салаларда заманауи технологияларды жетілдіруге мүмкіндік береді. Осылайша, оптикалық жүйелер қазіргі әлемнің ажырамас бөлігіне айналып отыр.

Заманауи оптикалық талшықтар деректерді жоғары жылдамдықта және ұзақ қашықтыққа жеткізу мүмкіндіктерімен ерекшеленеді. Олар негізінен екі түрге бөлінеді: бірмодалы (single-mode) және көпмодалы (multi-mode) талшықтар. Бірмодалы талшықтар жарық толқындарының тек бір бағытта өтуін қамтамасыз етеді, бұл шағын ядро диаметрінің арқасында жүзеге асады. Мұндай талшықтар ақпаратты үлкен қашықтыққа жоғалтусыз тасымалдауға өте қолайлы. Ал көпмодалы талшықтар кеңірек ядросымен ерекшеленіп, деректерді жақын қашықтыққа жоғары жылдамдықта жеткізу үшін тиімді болып табылады.

Оптикалық сенсорлар жарықтың таралу қасиеттеріне әсер ететін сыртқы факторларды өлшеу үшін қолданылады. Бұл құрылғылар температура, қысым, кернеу, химиялық құрам және басқа да физикалық немесе химиялық параметрлерді анықтауда жоғары дәлдікке ие. Сенсорлардың мұндай сезімталдығы оларды түрлі салаларда, соның ішінде өнеркәсіпте, медицинада және ғылыми зерттеулерде қолдануға мүмкіндік береді.

Бірмодалы және көпмодалы талшықтардың артықшылықтары мен оптикалық сенсорлардың кең мүмкіндіктері бұл технологияларды ақпарат тасымалдау мен қоршаған ортаның өзгерістерін бақылауда таптырмас құрал етеді. Олар қазіргі заманның маңызды ғылыми және техникалық жетістіктерінің бірі ретінде жоғары бағаланады.

Талшықты-оптикалық сенсорлардың негізгі түрлері мен олардың қолдану салалары кең ауқымды қамтиды. Интерферометриялық сенсорлар жарық интерференциясын қолдана отырып, физикалық параметрлердің өзгерісін жоғары дәлдікпен тіркейді. Брэгг торлары (Fiber Bragg Gratings) жарық толқындарының ұзындығын пайдалана отырып, температура мен механикалық кернеуді өлшейді және нақты уақыт режиміндегі өлшеулер үшін тиімді. Дистрибутивті сенсорлар талшық бойындағы ақпаратты жинақтап, ұзақ қашықтықтағы бақылау мүмкіндігін ұсынады.

Бұл сенсорлардың қолдану салалары да әртүрлі. Телекоммуникацияда оптикалық талшықтар интернет пен байланыс жүйелерінде жоғары өткізу қабілеті мен төмен шығынды қамтамасыз етеді. Медициналық салаларда, әсіресе эндоскопия, лазерлік хирургия және биосенсорлар сияқты технологияларда, олар науқастың жағдайын дәл бақылауға мүмкіндік береді. Инженерия мен құрылыс саласында Брэгг торлары бетон конструкцияларының деформациясын және кернеулерін қадағалау үшін пайдаланылады, бұл ықтимал апаттардың алдын алуға көмектеседі. Қоршаған ортаны қорғауда талшықты сенсорлар химиялық заттардың концентрациясын анықтап, ластанудың деңгейін бақылауда маңызды рөл атқарады.

Заманауи оптикалық талшықтар мен сенсорлар жоғары дәлдігі мен сенімділігінің арқасында қазіргі заманның маңызды технологияларының біріне айналды. Олар тек дәстүрлі салаларда ғана емес, кванттық коммуникация мен деректерді қауіпсіз жеткізу сияқты алдыңғы қатарлы бағыттарда да жаңа мүмкіндіктер ашады. Бұл жүйелер жасанды интеллект және IoT технологияларымен үйлескенде, деректерді тез өңдеу және күрделі жүйелерді басқару процесін жеңілдетеді. Сонымен қатар, жаңа материалдарды қолдану мен талшық өндірісін жетілдіру олардың тиімділігін одан әрі арттыруға мүмкіндік береді.

Оптикалық талшықтар мен сенсорлар ғылым мен техниканың көптеген салаларының дамуына айтарлықтай үлес қосуда. Олар адамзаттың заманауи қажеттіліктерін қанағаттандыруда және жоғары технологиялық шешімдерді ұсынуда жетекші орын алады.

Жарықтың ақпарат тасымалдау құралы ретіндегі рөлі ерекше. Жарық сигналдарын тасымалдау технологиялары заманауи байланыс және бақылау жүйелерінің негізін қалыптастырды. Оптикалық талшықтар жеңіл, икемді құрылымының арқасында ақпаратты үлкен жылдамдықпен және алыс қашықтыққа жеткізу мүмкіндігіне ие. Бұл қасиеттер оларды деректер тасымалдаудың ажырамас бөлігі ретінде жоғары сұранысқа ие етеді.

Жарықты тасымалдау үшін қолданылатын талшықтар бірнеше қабаттан тұратын құрылымға ие. Ең ішкі қабаты, өзекше, жарық сигналдарын бағыттау қызметін атқарады. Оны қоршаған сыртқы қабат жарықтың сынуын қамтамасыз етіп, оны талшық ішінде сақтайды. Мұндай құрылым жарық толқындарының жоғалуын азайтып, сигналды алыс қашықтыққа тиімді жеткізуге мүмкіндік береді. Әр түрлі технологиялық шешімдерге байланысты талшықтар жақын және алыс аралықтағы байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылады.

Талшық негізіндегі технологиялар жарықтың физикалық қасиеттерін өлшеуде жоғары дәлдігімен ерекшеленеді. Бұл құралдар температураны, қысымды және механикалық жүктемелерді анықтауда маңызды рөл атқарады. Жарық толқындарының өзгерісі арқылы ақпарат алу әдістері олардың әртүрлі салаларда қолданылуына жол ашады. Мысалы, жарық толқындарының ұзындығына тәуелді құралдар температура мен кернеудің өзгерістерін дәл анықтайтын инновациялық шешімдер ретінде танымал.

Жарық арқылы ақпарат тасымалдау технологиялары қазіргі заманның техникалық мүмкіндіктерін үздіксіз кеңейтіп келеді. Бұл технологиялар тек байланыс пен бақылау салаларында ғана емес, ғылым мен өнеркәсіпте де кеңінен қолданылып, инновациялық шешімдердің негізін қалап отыр.

Қазіргі заманғы оптикалық талшықтар мен сенсорлар байланыс және бақылау жүйелерінің маңызды бөлігіне айналды. Олар ақпаратты жеткізу және әртүрлі физикалық параметрлерді дәл өлшеу үшін кеңінен қолданылады. Бұл технологиялар заманауи қажеттіліктерге сәйкес үздіксіз жетілдіріліп, жаңа мүмкіндіктер ұсынып келеді.

Оптикалық талшықтар – жарық сигналдарын алыс қашықтықтарға тасымалдауға арналған арнайы құрылғылар. Олар негізінен шыны немесе пластиктен жасалып, жұмыс істеу принципі жарықтың толық ішкі шағылысуына негізделеді. Бұл әдіс жарық энергиясын талшық ішінде сақтай отырып, деректерді жоғалтусыз және тиімді жеткізуге мүмкіндік береді. Осындай құрылымның арқасында оптикалық талшықтар жоғары жылдамдық пен сенімділікті қамтамасыз етеді.

Бұл технологиялар ақпарат тасымалдау саласында ғана емес, сонымен қатар температура, қысым, кернеу сияқты параметрлерді дәл анықтау үшін де қолданылады. Оптикалық талшықтар мен сенсорлардың жоғары тиімділігі олардың әртүрлі салаларда – телекоммуникация, медицина, өнеркәсіп және ғылымда кеңінен қолданылуын қамтамасыз етеді. Осылайша, бұл құрылғылар заманауи технологиялық жүйелердің негізін қалыптастырып, адамзаттың техникалық жетістіктерін дамытуға ықпал етеді.

Заманауи оптикалық жүйелер деректерді беру кезінде өте төмен шығындарымен ерекшеленеді, бұл оларды дәстүрлі кабельдік желілерге қарағанда анағұрлым тиімді етеді. Мұндай жүйелердің негізгі артықшылықтарының бірі – электромагниттік әсерлерге төзімділігі және үлкен өткізу қабілеті. Бұл қасиеттер оптикалық жүйелерді тек телекоммуникация саласында ғана емес, сонымен қатар медицина, өнеркәсіп және басқа да салаларда кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

Оптикалық сенсорлар да қазіргі технологиялардың маңызды бөлігіне айналған. Олар жарықтың физикалық қасиеттерінің өзгерісін өлшеу арқылы әртүрлі параметрлерді анықтайды. Мұндай құрылғылардың жоғары сезімталдығы оларды температура, қысым, механикалық кернеу сияқты көрсеткіштерді нақты уақыт режимінде бақылауға тиімді құрал етеді.

Сонымен қатар, бұл сенсорлар жоғары дәлдігі мен сенімділігі арқасында өнеркәсіптік бақылау, құрылыс салалары және медициналық диагностикада үлкен сұранысқа ие. Жарық негізіндегі технологиялардың кең қолданылуы заманауи жүйелердің тиімділігін арттырып, олардың техникалық мүмкіндіктерін одан әрі жетілдіруге ықпал етеді. Осылайша, оптикалық жүйелер мен сенсорлар инновациялық шешімдердің негізін қалап, әртүрлі салалардың дамуында басты рөл атқарады.

Бүгінгі таңда оптикалық талшықтар мен сенсорлар технологиялық дамудың маңызды бөліктерінің бірі саналады. Олар байланыс жүйелерін, деректерді жеткізу тәсілдерін және бақылау құралдарын жетілдіруде маңызды рөл атқара отырып, ғылыми зерттеулер мен өндірістік процестердің тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Заманауи оптикалық талшықтар көптеген артықшылықтарға ие, бұл оларды коммуникация және сенсорлық технологияларда кеңінен пайдалануға мүмкіндік береді. Ең алдымен, олардың үлкен өткізу қабілеті деректердің үлкен көлемін алыс қашықтықтарға тез және сенімді жеткізуге жағдай жасайды. Бұл қасиет оптикалық талшықтарды ақпараттық жүйелердің ажырамас бөлігіне айналдырды.

Сонымен қатар, талшықтардың шағын және жеңіл құрылымы оларды әртүрлі салаларда қолдануға ыңғайлы әрі тиімді етеді. Телекоммуникация, медицина, өнеркәсіп және ғылыми зерттеулер сияқты салаларда оптикалық талшықтар жоғары сенімділік пен тиімділікті қамтамасыз етіп, заманауи технологиялық шешімдерге жол ашуда. Осылайша, оптикалық жүйелер қазіргі заманның прогрессивті қажеттіліктерін қанағаттандыруда жетекші рөл атқаруда.

Оптикалық талшықтарға негізделген сенсорлар бүгінгі таңда технологиялық процестерді бақылау мен зерттеу саласында ерекше маңызға ие. Мұндай сенсорлар температураны, қысымды, деформацияны және ортаның химиялық құрамын жоғары дәлдікпен анықтай алады. Олардың жұмыс принципі өлшенетін параметрлердің өзгерістеріне байланысты талшық арқылы өтетін жарық сигналының сипаттамаларының өзгеруіне негізделген. Жарық толқындарындағы бұл өзгерістер кейіннен ақпаратты өңдеу мен талдауға пайдаланылады.

Оптикалық сенсорлардың басты артықшылықтары – жоғары сезімталдық пен дәлдік. Бұл қасиеттер оларды әртүрлі салаларда маңызды құралға айналдырды. Өнеркәсіпте олар құрылымдардың беріктігін бақылау үшін қолданылса, медицинада дене температурасы мен басқа биологиялық параметрлерді анықтауда кеңінен пайдаланылады. Сонымен қатар, экология саласында оптикалық сенсорлар қоршаған ортаның жағдайын бақылауға мүмкіндік береді.

Заманауи оптикалық сенсорлар технологиялық процестердің тиімділігін арттырып қана қоймай, олардың қауіпсіздігін де қамтамасыз етеді. Олардың қолдану аясының кеңдігі бұл құрылғыларды қазіргі заманғы технологиялар мен зерттеулердің ажырамас бөлігіне айналдырды.

Заманауи оптикалық талшықтар мен сенсорлар технологиялық прогрестің негізгі қозғаушы күштерінің бірі болып табылады. Олардың шағын өлшемі, жоғары тиімділігі және дәлдігі бұл құрылғыларды күрделі жүйелердің маңызды құрамдас бөлігіне айналдырды. Олар ғылыми зерттеулерді жетілдіруге және өндірістік процестерді оңтайландыруға айтарлықтай үлес қосып, болашақта жаңа мүмкіндіктерге жол ашуда.

Мысалы, талшықты-оптикалық сенсорлар инфрақұрылым нысандарында, соның ішінде көпірлер мен құбырларда деформацияны бақылау үшін кеңінен қолданылады. Бұл сенсорлар деформацияға жоғары сезімталдық танытады, өйткені мұндай өзгерістер талшық арқылы өтетін жарық сигналдарының сипаттамаларын өзгертеді. Мұндай технологияның көмегімен деформацияның нақты орнын және дәрежесін дәл анықтауға болады. Бұл инфрақұрылымның қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады [24].

Оптикалық талшықтар мен сенсорлардың қолданылу аясы өте кең, ал олардың артықшылықтары оларды көптеген салаларда, соның ішінде өнеркәсіп, медицина және экологияда қолдануға мүмкіндік береді. Бұл

технологиялар адамзаттың заманауи қажеттіліктерін қанағаттандыруда және жаңа инновациялық шешімдерді іске асыруда басты орынға ие.

Оптикалық сенсорлар медицина саласында физиологиялық параметрлерді бақылау үшін кеңінен қолданылады. Олар қандағы оттегі деңгейін, қан қысымын және басқа маңызды көрсеткіштерді өте дәл өлшеуде тиімді. Бұл құрылғылардың басты артықшылығы - жоғары дәлдігі және өлшеу объектісіне минималды әсер етуі.

[25] жұмысында бетонның шөгуі кезінде тартылу кернеулері шоғырланған аймақтардағы кернеулі-деформацияланған күй мен жалпы деформацияны өлшеу әдісі ұсынылған, ол үшін оптикалық талшықтар мен Брэгг торлары пайдаланылады. Брэгг торлары негізінде бетон конструкцияларындағы арматуралық шыбықтар мен түйіспелердің сырғуын бақылау жүйелерін жасауға арналған зерттеулер де бар [26].

[27] зерттеуінде Брэгг торлары бар талшықты тензометрлерді көпір конструкцияларындағы зақымданған аймақтарды анықтау үшін қолдану ұсынылған. Сондай-ақ алдын ала кернелген бетон конструкцияларындағы қалыпты деформацияларды болжау жүйелері бар. Бұл әдіс Брэгг торларын, бетон конструкциясының жеңілдетілген аналитикалық моделін және нейрондық желілерді қолданады [28]. Брэгг торларын қолдану оң қасиеттерімен қатар, талшықты-оптикалық датчиктердің (ТОД) күрделі құрылымы мен жоғары құны сияқты қиындықтарды да тудырады.

Маха–Цендер интерферометрі принципінде жұмыс істейтін ТОД жүйелері ультрадыбыстық кернеу толқындарын анықтау үшін қолданылады [29–31]. Мұндай датчиктердің сезімталдығы талшықтың ұзындығына байланысты және жоғары шу деңгейі байқалады. Фабри–Перро интерферометрлері бетон конструкцияларының күйін бағалау үшін де пайдаланылады [32, 33]. Фабри–Перро интерферометрі негізіндегі ТОД қолдану кезінде кросс-кедергілер туындайды, оларды жою үшін бірнеше негізгі әдістерді біріктіреді. [34] зерттеуінде Фабри–Перро интерферометрі мен Брэгг торлары принципінде жұмыс істейтін квазитармақталған ТОД гибриді жүйесі сипатталған.

Басқа әдіс таралған ТОД жүйесінде Рэлей шашырауы принципін пайдаланады [35, 36]. Бұл әдіс жоғары кеңістіктік ажыратымдылықпен деректерді алуға мүмкіндік береді, бірақ өлшеу қашықтығы 100 м-ге дейін шектелген. Сонымен қатар Бриллюэн шашырауы принципін қолданатын жүйелер де бар [37].

Оптикалық сенсорлардың кең қолданылуы олардың жоғары сезімталдығы мен әмбебаптығымен түсіндіріледі. Бұл құрылғылар тек медицина мен инженерияда ғана емес, сондай-ақ экология, энергетика және өнеркәсіп салаларында да кеңінен пайдаланылуда. Мысалы, оптикалық сенсорлар арқылы қоршаған ортаның түрлі параметрлерін, химиялық заттардың құрамын немесе энергия жүйелеріндегі өзгерістерді дәл бақылауға болады.

Олардың жоғары тиімділігі мен дәлдігі бұл сенсорларды көптеген салаларда, әсіресе мониторинг пен бақылауды талап ететін жағдайда, қажетті құралға айналдырады. Осылайша, оптикалық сенсорлар заманауи технологиялардың бір бөлігі ретінде әлемнің түрлі салаларында тиімді әрі сенімді шешімдер ұсынады [38].

Қорыта келгенде, талшықты-оптикалық сенсорлар қазіргі уақытта инфрақұрылым мен медициналық технологиялардың маңызды құрамдас бөлігіне айналды. Олар жоғары дәлдіктегі өлшеу мүмкіндіктерімен қамтамасыз етіп қана қоймай, әртүрлі салаларда қауіпсіздік пен тиімділікті арттыруда үлкен рөл атқаруда. Бұл технологиялар болашақта жаңа зерттеулер мен жетістіктерге негіз болатындығы сөзсіз.

Оптикалық талшықтар мен сенсорлық жүйелер қазіргі заманғы байланыс, мониторинг және медицина салаларында жаңа мүмкіндіктерге жол аша отырып, үздіксіз дамып келеді. Олардың жоғары тиімділігі мен әмбебаптығы оларды заманауи технологиялардың негізгі бөліктері ретінде сақтап қалуға мүмкіндік береді. Осылайша, оптикалық сенсорлар және талшықты-оптикалық жүйелер өздерінің әртүрлі салалардағы маңызды рөлін сақтай отырып, жаңа мүмкіндіктерге ие болуда [39].

Олардың қолданылу ауқымы кеңейіп, ғылым мен техниканың түрлі салаларында зерттеу мен даму үшін жаңа бағыттар ашылуда. Талшықты-оптикалық технологиялардың келешегі зор, және олар адамзаттың өмір сүру сапасын жақсартуға ықпал ететін жаңа шешімдер ұсынады.

Оптикалық талшық, немесе жарық бағыттағыш, үш негізгі қабаттан тұрады: өзекше, қаптама және қорғаныс қабаты. Өзекше – талшықтың ішкі бөлігі, оның диаметрі 6-дан 62,5 микрометрге дейін болады. Бұл бөліктің басты міндеті – жарық толқындарын толық ішкі шағылысу арқылы тасымалдау. Қаптама қабаты өзекшенің ішінде жарықтың сақталуын қамтамасыз етеді, ал сыртқы қорғаныс қабаты талшықты механикалық зақымданулардан қорғайды.

Оптикалық талшық арқылы жарық толқындары ақпарат тасымалдау үшін қолданылады. Бұл әдісте модуляцияланған жарық толқындары арқылы сигналдар беріледі, олар деректерді жоғары жылдамдықпен және ұзақ қашықтыққа жеткізуге мүмкіндік береді. Мұндай технология әсіресе телекоммуникация саласында үлкен маңызға ие, өйткені ол жоғары жылдамдықтағы деректерді тиімді тасымалдауға мүмкіндік береді.

Оптикалық талшықтар дәстүрлі мыс сымдарға қарағанда бірнеше артықшылыққа ие. Олар деректерді жоғалтусыз жеткізіп, электромагниттік кедергілерге төзімді болып келеді, бұл оларды әртүрлі салаларда тиімді қолдануға мүмкіндік береді. Талшықты-оптикалық жүйелердің жоғары тиімділігі мен сенімділігі оларды заманауи байланыс және ақпараттық жүйелердің негізіне айналдырады.

Оптикалық сенсорлар мониторинг және диагностика салаларында кеңінен қолданылып келеді. Олар инфрақұрылымның жағдайын бақылауда, мысалы, көпірлер мен құбырлардағы деформацияны анықтауда, сондай-ақ

медициналық салаларда физиологиялық параметрлерді өлшеуде жоғары дәлдікпен жұмыс істейді. Бұл сенсорлар түрлі физикалық және химиялық өзгерістерді анықтап, нақты уақыт режимінде бақылау мүмкіндігін береді, бұл оларды маңызды құралға айналдырады.

Қазіргі уақытта оптикалық талшықтар мен сенсорлық технологиялар байланыс жүйелерінің негізі болып табылады және болашақта жаңа жетістіктерге жетелейтін маңызды салалардың бірі ретінде қала береді. Бұл технологиялардың дамуы мен кең таралуы байланыс саласының өнімділігін арттыруға ықпал етеді [40, 41].

Оптикалық талшықтар бірнеше негізгі параметр бойынша жіктеледі, олардың ішінде режимдер саны (бірмодалы және көпмодалы), сыну көрсеткішінің профилі (қадамдық, параболалық және арнайы), дисперсия параметрі және таңба дисперсиясының параметрі DDD (оң және теріс) бар. Талшықты-оптикалық технологияда кеңінен қолданылатын екі негізгі талшық түрі - бірмодалы (SMF) және көпмодалы (MMF) талшықтар. Осы талшықтар түрлерінің әрқайсысы әртүрлі қолданбалы талаптарға сәйкес келеді, олардың ерекшеліктері байланыстың тиімділігі мен сапасын қамтамасыз етеді.

1.1.1 Көпмодалы талшық (MMF – Multimode Fiber)

Көпмодалы талшық (MMF – Multimode Fiber) жарықтың бірнеше түрлі жолдармен немесе режимдермен таралуына мүмкіндік береді, бұл оның кеңірек өзекше диаметрімен байланысты. Әдетте, көпмодалы талшықтың өзекше диаметрі 50 микрон немесе 62,5 микронды құрайды. Бұл талшық түрі жарықтың бірнеше жолмен таралуынан туындайтын дисперсиялық әсерге сезімтал, бұл оның ақпарат тасымалдау ұзақтығына шектеулер қояды.

Көпмодалы талшық әдетте қысқа қашықтықта пайдаланылады. Бұл талшық түрі ғимараттар мен кампустар арасындағы жергілікті желілерді (LAN) қосу үшін өте ыңғайлы. Көпмодалы талшықтың басты артықшылығы - оның арзан және қарапайым құрылғылармен жұмыс істей алуы, бұл оны көптеген қолданбалар үшін тартымды етеді. Дегенмен, дисперсияның жоғары деңгейі көпмодалы талшықтың ұзақ қашықтыққа ақпарат тасымалдауда тиімділігін төмендетеді. Сондықтан көпмодалы талшық негізінен шағын ауқымдағы желі қосылымдары мен қысқа қашықтықтағы қолданбаларда кеңінен пайдаланылады.

Көпмодалы талшық көбінесе қысқа қашықтықта пайдалануға арналған. Ол, әсіресе, ғимараттар мен кампустар арасындағы жергілікті желілерді (LAN) құру үшін өте тиімді. Бұл талшықтың басты артықшылығы – оның қолжетімділігі мен қарапайым құрылғылармен үйлесімділігі. Көпмодалы талшықтың бағасы арзан болғандықтан, ол көптеген қолданушы үшін қолайлы шешім болып табылады. Сонымен қатар, оны орнату және пайдалану оңай, бұл оны көптеген жергілікті желі жобаларында сұранысқа ие етеді.

Дегенмен, көпмодалы талшықтың негізгі кемшілігі – оның жарықтың бірнеше жолмен таралуынан туындайтын дисперсия әсері. Бұл құбылыс

сигналдың уақыт бойынша таралуын және оның сапасын нашарлатуы мүмкін, нәтижесінде талшық ұзақ қашықтықтарға деректерді жеткізуде тиімділігін жоғалтады. Осыған байланысты көпмодалы талшық негізінен қысқа қашықтықтағы байланыс үшін қолданылады, мысалы, бір ғимарат ішінде немесе шағын аудандарда. Бұл жағдай оның кең ауқымдағы байланыс жүйелерінде қолданылуын шектейді, бірақ жергілікті желілерде, корпоративті және білім беру желілерінде ол кеңінен пайдаланылады.

1.1.2 Бірмодалы талшық (SMF – Singlemode Fiber)

Бірмодалы талшық (SMF – Singlemode Fiber) жарықтың тек бір бағытта таралуын қамтамасыз етеді, бұл оның өзекше диаметрінің өте кішкентай болуының нәтижесінде жүзеге асады. Әдетте, бірмодалы талшықтың өзекше диаметрі 9 микрон шамасында болады. Өзекшенің мұндай аз диаметрі жарықтың тек бір жолмен қозғалуына мүмкіндік беріп, дисперсияны минимизациялайды. Бұл ерекшелік талшық арқылы сигналдың ұзақ қашықтыққа, кедергісіз және тиімді берілуін қамтамасыз етеді.

Бірмодалы талшық негізінен телекоммуникация, кең аймақтық желілер (WAN) және магистральдық желілерде кеңінен қолданылады. Оның басты артықшылығы – ұзақ қашықтықта сигналдың жоғалтусыз берілуі. Бұл талшық түрі жоғары жылдамдықты деректерді тасымалдауға мүмкіндік беретіндіктен, үлкен ауқымды желілер мен ақпараттық инфрақұрылымдар үшін өте қолайлы. Сонымен қатар, бірмодалы талшықтың үлкен өткізу қабілеті бар, бұл оны болашақ желілік жүйелер үшін тиімді әрі икемді етеді. Қысқаша айтқанда, бірмодалы талшықтың жоғары өнімділігі мен сенімділігі оны қазіргі замандағы ең маңызды байланыс технологияларының бірі етеді.

1.1.3 Сыну көрсеткішінің профилі және дисперсия

Оптикалық талшықтың сыну көрсеткішінің профилі оның жарық сигналдарын тарату қабілетіне тікелей әсер етеді. Қадамдық профиль жарықтың өткір шекаралар арқылы таралуын қамтамасыз етіп, белгілі бір бағытта тиімді жұмыс істейді. Ал параболалық және арнайы профильдер жарықтың таралуын біркелкі етуге және дисперсияны азайтуға мүмкіндік береді. Бұл профильдер талшық арқылы берілетін сигналдың сапасын арттырады.

Дисперсия параметрі оптикалық талшықтың жұмысында маңызды рөл атқарады, өйткені ол жарық толқындарының таралуындағы уақыттық айырмашылықтарды көрсетеді. Бірмодалы талшықтағы дисперсияның төмен болуы оның басты артықшылығы болып табылады, себебі бұл сигналдың ұзақ қашықтыққа жоғалтусыз берілуіне мүмкіндік береді. Ал көпмодалы талшықта дисперсия жоғары болғандықтан, оны тек қысқа қашықтықта қолдану тиімді болады.

Таралған талшықты-оптикалық датчик (ТОД) ретінде ODiSI 6104 жүйесі пайдаланылды. Зерттеуде эмпирикалық болжамдар қолданылды, онда кейбір параметрлер асыра немесе кемітіліп көрсетілді. Дегенмен, таралған ТОД бетон қабырғалары блоктарындағы деформациялардың енуін жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік берді. Бірақ таралған ТОД-тың бағдарламалық қамтамасыздандыруы өлшеулерді тек 10 –15% деформациялармен шектейді.

Зерттеулерде аппараттық-бағдарламалық кешендерді әзірлеуде авторлардың бірегей конструкторлық шешімдері қарастырылған [42]. Жобаның әлемдік аналогтардан негізгі айырмашылығы – бұл бірмодалы оптикалық талшықтармен (ОТ) жұмыс істейтін және теледидар матрицасының бетіне түсетін жарық дақтарының пикселдерін талдайтын бағдарламалық-аппараттық кешеннің жасалуы [43]. Бірмодалы ОТ пайдалану деректерді өңдеу блогынан ОТ орнатылған жерге дейінгі қашықтықты едәуір арттыруға мүмкіндік береді.

Бетон арқалықтардың тұтастығын бақылау үшін ОТ қолдануға арналған алдын ала зерттеулер жүргізілді [44].

Бірмодалы оптикалық талшық Гаусс таралуымен сипатталатын сатылы профильге ие, ал жарық дақтарында, әсіресе температура өзгергенде, айтарлықтай шу пайда болады. Бұл өлшеу процесін қиындатады [45]. Арнайы бағдарламалық-аппараттық кешеннің интеллектуалды деректерді өңдеу жүйесі ғана бұл мәселелерді шешуге мүмкіндік береді.

Бұған дейін ұқсас жұмыстар тау-кен қазбалары мен бетон бекіткіштердің тұтастығын бақылауға арналған ОТ әзірлеу бойынша жүргізілген болатын [46]. Бұл принциптерді әрі қарай жетілдіру үшін қолдану жоспарлануда.

Анализ көрсеткендей, құрылыс конструкцияларының, әсіресе монолитті құрылымдардың бұзылуын диагностикалауда проблема бар. Сондықтан бұл процесті, әсіресе жарықшақтарды визуалды тексеру арқылы анықтау мүмкін болмайтын ерте кезеңдерде тиімді бақылауға арналған жаңа әдістер мен құралдарды әзірлеу қажет [47].

Қорытындылай келе, оптикалық талшықтардың екі негізгі түрі – бірмодалы және көпмодалы – әртүрлі қолдану салаларына арналған. Бірмодалы талшықтар жоғары жылдамдықты және ұзақ қашықтықтағы байланыс үшін өте ыңғайлы, ал көпмодалы талшықтар шағын және орта қашықтықтағы желілерде қолданылады. Әрбір түрі өз артықшылықтары мен ерекшеліктеріне байланысты белгілі бір жағдайларда тиімді таңдалады.

Оптикалық сенсорлар қазіргі уақытта түрлі технологиялық салаларда маңызды рөл атқарады, әсіресе қоршаған ортадағы әртүрлі параметрлерді өлшеуде. Бұл сенсорлар жарықтың қасиеттерін пайдаланып, физикалық, химиялық немесе биологиялық өзгерістерді анықтайды. Олардың жұмыс принципі негізінен жарық сигналдарының өзгерістеріне негізделген, бұл арқылы өлшенетін параметрлердің жағдайы бақыланады. Әсіресе интерферометриялық негізде жұмыс істейтін оптикалық сенсорлар ерекше орын алады. Мұндай сенсорлар қысым, температура, деформация және басқа

да физикалық параметрлерді анықтауда жарық толқындарының интерференция құбылысын пайдаланады. Интерференция жарық толқындарының өзара әсерлесуінен туындайтын құбылыс болып табылады, және бұл әсерлер сенсордың сезімталдығын арттырады. Қоршаған ортадағы өзгерістер жарық сигналдарының фазасы мен амплитудасына әсер етіп, сенсор оларды өлшеу арқылы қажетті ақпаратты алады. Бұл сенсорлар жоғары дәлдікпен және сезімталдықпен ерекшеленеді, оларды әртүрлі ғылым және өнеркәсіп салаларында қолдануға мүмкіндік береді.

1.1.4 Интерферометр негізіндегі сенсорлар

Интерферометрлер жарықтың жолындағы өзгерістерді анықтай отырып, өлшеу жұмыстарын жүргізеді. Бұл құрылғылардың ішінде Майкельсон және Фабри-Перо интерферометрлері ерекше маңызға ие. Майкельсон интерферометрі екі түрлі жарық жолының таралуын салыстырып, олардың арасындағы фазалық айырмашылықты өлшейді. Бұл тәсіл жарықтың жолындағы нақты өзгерістерді дәл анықтауға мүмкіндік береді. Ал Фабри-Перо интерферометрі жарықтың бірнеше рет шағылуынан пайда болатын интерференциялық үлгілерді қолданады, бірақ оның принципі Майкельсонға ұқсас. Бұл интерферометрлер жоғары сезімталдықты қамтамасыз етіп, оларды әсіресе өте дәл өлшеулерді қажет ететін қолданбаларда қолдануға мүмкіндік береді. Интерференция құбылысы арқылы алынған ақпарат өте нақты және сенімді болып табылады, бұл сенсорлардың түрлі ғылыми және өнеркәсіптік салаларда кеңінен пайдаланылуына себеп болады. Мұндай құрылғылардың қолданылуы көптеген өлшеулер мен бақылаулардың дәлдігін арттырады, әсіресе олардың көмегімен физикалық параметрлердің, мысалы, температура, қысым немесе деформация өзгерістерін тіркеу кезінде тиімді нәтижелер алынатын болады.

1.1.5 Фазаға сезімтал интерферометрлер

Бұл сенсорлар діріл мен акустикалық толқындарды анықтау үшін қолданылады. Олардың жұмыс істеу принципі жарық фазасының өте дәл өзгерістерін тіркеуге негізделген. Мұндай сенсорлар түрлі салаларда кеңінен қолданылады, өнеркәсіптік қондырғылардан бастап, медициналық жабдықтарға дейін. Олар қоршаған ортадағы әртүрлі физикалық параметрлерді бақылау мен бақылауға мүмкіндік береді.

Шашырауға негізделген сенсорлар жарықтың шашырау құбылысын талдай отырып, қоршаған ортадағы өзгерістерді анықтайды. Бұл технологияда екі негізгі шашырау түрі бар: Раман шашырауы және Бриллюэн шашырауы.

Раман шашырауы жарықтың молекулалармен өзара әрекеттесуінен пайда болады және температура мен химиялық құрамды анықтауда тиімді. Бұл сенсорлар химиялық құрамды зерттеу үшін өте пайдалы, себебі олар молекулалық деңгейде өзгерістерді тіркейді. Сонымен қатар, олар

температураны жоғары дәлдікпен өлшей алады, бұл өнеркәсіп пен ғылыми зерттеулер үшін маңызды артықшылық болып табылады. Осылайша, Раман шашырауы негізінде жұмыс істейтін сенсорлар әртүрлі ғылыми зерттеулер мен өнеркәсіптік қолданулар үшін маңызды құралдарға айналады, олар химиялық және физикалық параметрлердің өзгерістерін дәл тіркеуге мүмкіндік береді.

Бриллюэн шашырауына негізделген сенсорлар талшықтағы температура мен деформацияны өлшеуге арналған. Олар жарықтың таралуына әсер ететін механикалық өзгерістерді анықтай отырып, талшық ішінде орын алатын физикалық өзгерістерді тіркейді. Бұл сенсорлар негізінен құрылымдық денсаулық мониторингінде, мысалы, көпірлер мен ғимараттардың беріктігін бақылауда қолданылады. Олар құрылымдардың жағдайын нақты уақыт режимінде бақылап, қауіпсіздік деңгейін арттыруға мүмкіндік береді.

Оптикалық сенсорлар әртүрлі салаларда кеңінен пайдаланылады, өйткені олардың жоғары дәлдігі мен сезімталдығы көптеген жүйелердің тиімділігін арттыруда маңызды рөл атқарады. Бұл сенсорлар инженерия, медицина, қоршаған ортаны бақылау, телекоммуникация және өнеркәсіптік автоматтандыру салаларында кеңінен қолданылады. Интерферометрлік сенсорлар жоғары дәлдікті өлшеуді талап ететін жағдайларда таптырмас құрал болып табылады, себебі олар өте дәл нәтижелер береді және үлкен өлшеу ауқымын қамтиды. Ал шашырауға негізделген сенсорлар, әсіресе күрделі және нақты параметрлерді анықтау үшін тиімді, бұл оларды әртүрлі салаларда қолданудың әмбебаптығын көрсетеді.

Оптикалық сенсорлар арасында Пекарр эффектісіне негізделген құрылғылар ерекше орын алады. Бұл сенсорлар қоршаған ортадағы физикалық параметрлердің, мысалы, температура мен қысымның өзгерісіне реакция ретінде жарықтың толқын ұзындығын өзгертуге негізделген. Мұндай сенсорлар жарықтың қасиеттерін пайдалану арқылы өте дәл және сенімді деректерді алу мүмкіндігін береді.

Талшықты Брэгг торлары бар датчиктер (FBG - Fiber Bragg Grating) оптикалық сенсорлар арасында кеңінен қолданылатын түрлердің бірі болып табылады. Бұл датчиктер жарықтың толқын ұзындығының өзгеруін анықтау үшін арнайы жасалған оптикалық талшықтарды пайдаланады. Брэгг торлары талшықтың белгілі бір бөлігінде жарықтың таралуын өзгерту үшін қолданылатын арнайы аймақтар болып табылады. Сенсордың жұмыс принципі қоршаған ортаның параметрлерінің өзгеруімен байланысты, бұл өзгерістер Брэгг толқын ұзындығының ауытқуына әкеледі. Яғни, температура мен механикалық кернеу сияқты параметрлердің өзгеруі Брэгг торының толқын ұзындығын өзгертіп, оның көмегімен нақты өлшемдер алуға болады.

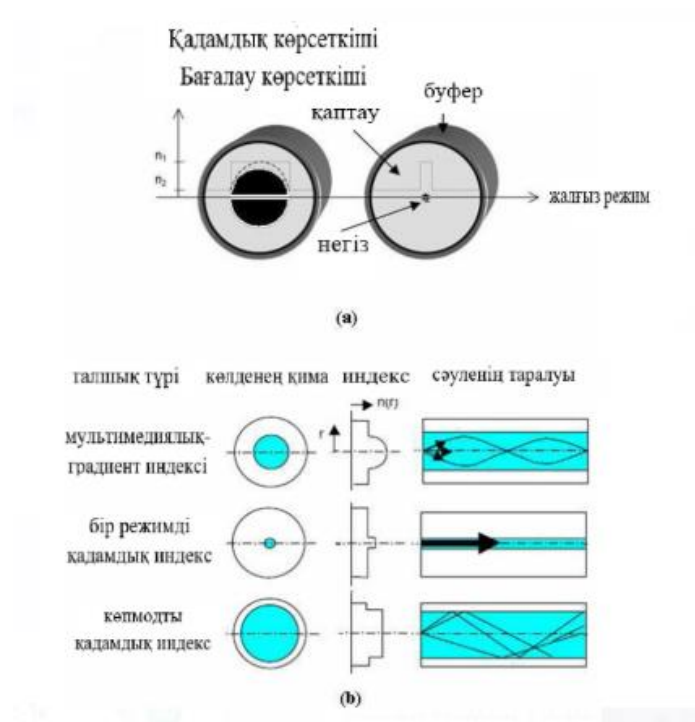
Бұл сенсорлар жоғары дәлдікпен жұмыс істейтіндіктен, олар телекоммуникация, құрылымдық мониторинг және өнеркәсіп салаларында кеңінен қолданылады. Брэгг торлы датчиктер тұрақтылығы мен дәлдігі арқасында заманауи технологияларда маңызды құралға айналды.

Оптикалық сіңіру сенсорлары қоршаған ортадағы жарықтың қарқындылығын жұту өзгерістерін анықтайды. Бұл сенсорлардың негізгі функциясы – газдар мен химиялық заттардың концентрациясын өлшеу. Жарық толқындары белгілі бір химиялық заттар арқылы өткенде, олар оның белгілі бір ұзындығын сіңіреді. Оптикалық сіңіру сенсорлары осы сіңіру өзгерістерін тіркеп, ортаның құрамын анықтайды. Бұл технология көбінесе өнеркәсіптік өндірістерде, экологиялық мониторингте және қауіпсіздік жүйелерінде қолданылады, себебі ол қоршаған ортадағы химиялық заттарды тиімді және дәл бақылауға мүмкіндік береді.

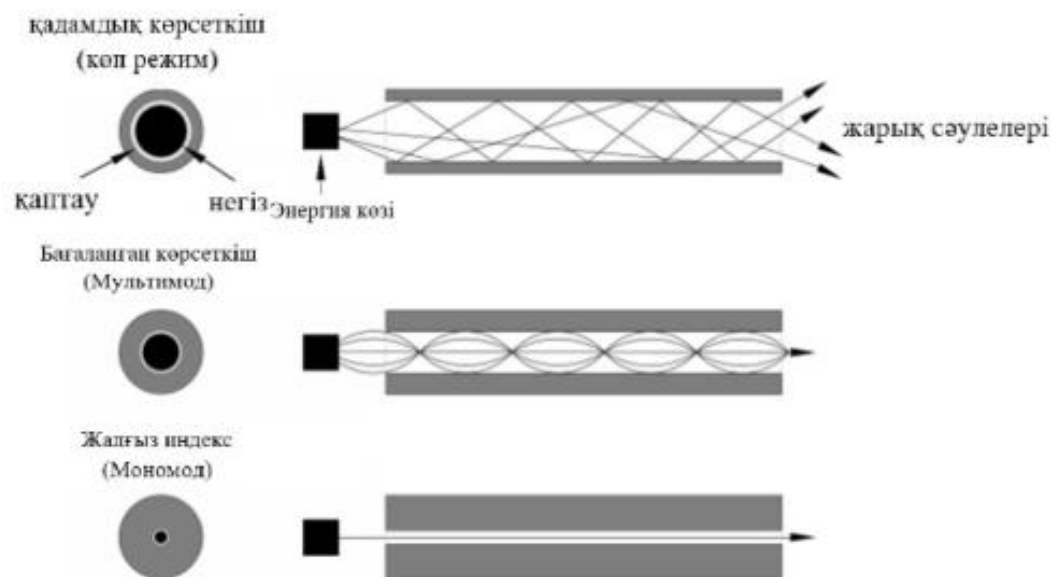
ISO/IEC 11801 стандарты оптикалық талшықтарды жіктеудің негізі болып табылады. Бұл стандарт мультимодалы оптикалық талшықтарды төрт санатқа бөледі: OM1, OM2, OM3 және OM4. Әр санат талшықтың өткізу қабілеті мен сигнал беру мүмкіндігіне байланысты ерекшеленеді. Мысалы, OM1 және OM2 талшықтары қысқа қашықтықтарға арналған, ал OM3 және OM4 талшықтары Gigabit Ethernet технологиясы үшін жоғары жылдамдықта және ұзақ қашықтыққа сигнал беру үшін қолайлы. Бұл стандарттар талшықтардың максималды өткізу жылдамдығы мен қашықтығын анықтайтын негізгі көрсеткіштер болып табылады, сондықтан олар желілік инфрақұрылым үшін маңызды.

Пекарр эффектісіне негізделген сенсорлар, Брэгг торлары бар датчиктер және оптикалық сіңіру сенсорлары әртүрлі салаларда кеңінен пайдаланылады. Бұл сенсорлар қоршаған ортадағы нақты өзгерістерді дәл анықтау және параметрлерді өлшеу үшін маңызды құралдар болып табылады. Олардың басты артықшылықтары – жоғары сезімталдық, сенімділік және әртүрлі жағдайлар мен ортаға бейімделу қабілеті. Бұл сенсорлар физикалық, химиялық және биологиялық өзгерістерді тиімді тіркеп, нақты деректер алуға мүмкіндік береді.

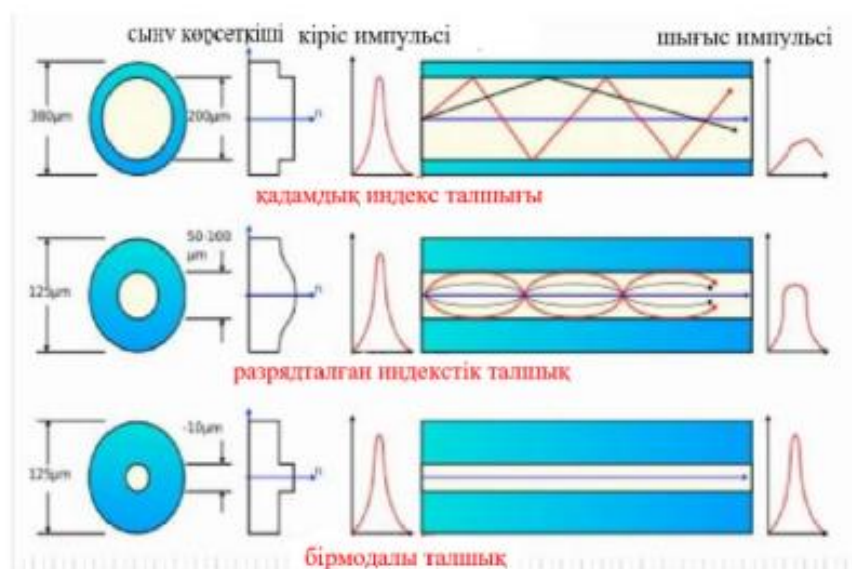
Қорыта айтқанда, пекарр эффектісіне негізделген сенсорлар мен оптикалық талшықтар қазіргі заманауи технологиялардың маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Олар әртүрлі салаларда, әсіресе физикалық және химиялық параметрлерді дәл анықтау талап етілетін жағдайларда кеңінен қолданылады. Брэгг торлары, оптикалық сіңіру сенсорлары және мультимодалы талшықтардың әртүрлілігі олардың қолдану салаларын кеңейтеді, бұл олардың тиімділігін арттырады. ISO/IEC 11801 стандарты бойынша талшықтарды жіктеу байланыс жүйелерін онтайлы түрде жобалап, дамытуға мүмкіндік береді. Бұл стандарттармен жұмыс жасау принциптері мен әдістерін келесі суреттерден көруге болады.



1.1 - сурет – Талшық түрлеріне талдама және жұмыс принциптері



1.2 - сурет – Оптикалық кабельдің сигнал тарату ерекшеліктері



1.3 - сурет – Оптикалық талшықтардың жарық сигналын тарату сипаттамалары

Бұл суретте оптикалық талшықтардың әртүрлі түрлері және олардың сигнал тарату ерекшеліктері көрсетілген. Әр талшық түрі жарық сигналын тарату әдісіне байланысты ерекшеленеді.

Қадамдық көрсеткішті көпмодалы талшық (Step-Index Multimode Fiber). Бұл талшықта жарық сәулелері өзекше пен қабық арасындағы шекарадан шағылу арқылы тарайды. Жарық бірнеше жолмен таралатыдықтан, дисперсия деңгейі жоғары болады, бұл оны негізінен қысқа қашықтықтағы байланыстар үшін қолайлы етеді.

Градиентті көрсеткішті көпмодалы талшық (Graded-Index Multimode Fiber). Мұндай талшықта жарық сәулелері өзекше ішінде синусоидалық жолмен таралады. Бұл әдіс жарықтың таралу жылдамдығын әртүрлі аймақтарда өзгертеді, бұл дисперсияны азайтып, сигналдың сапасын жақсартады. Ол орташа қашықтықтағы байланыс үшін тиімді.

Бірмодалы талшық (Singlemode Fiber). Бұл талшықта жарық сәулесі тек бір ғана жолмен таралады. Осылайша, дисперсия минималды болып, сигналдың ұзақ қашықтыққа жоғалмастан берілуін қамтамасыз етеді. Бірмодалы талшық телекоммуникация және магистральдық желілерде кеңінен қолданылады.

Бұл сурет әрбір талшықтың құрылымдық ерекшеліктерін және қолдану саласындағы айырмашылықтарын түсінуге көмектеседі.

1.2 Брэгг торларының тарихы мен олардың даму кезеңдері

Брэгг торлары (Bragg Gratings) қазіргі оптикалық жүйелер мен телекоммуникация саласында маңызды компонент болып табылады. Олардың дамуы XX ғасырдың басында басталып, бірнеше маңызды кезеңдерден өтті. Брэгг торларының негізі Брэгг эффектісіне құрылған, бұл құбылыс 1913 жылы ашылды.

Брэгг эффектісін алғаш ашқан ағылшын ғалымдары Уильям Лоуренс Брагг пен оның әкесі Уильям Генри Брэгг болды. Олар рентген сәулелерінің кристалдармен өзара әрекеттесуін зерттей отырып, рентгендік дифракция заңын ашты. Бұл заң кристалдардың атомдық жазықтықтарынан шағылған рентген сәулелерінің конструктивті кедергі жасау жағдайын сипаттайды. Брэгг заңы кристалдардың ішкі құрылымын зерттеуге мүмкіндік берді, осылайша ол ғылымға үлкен серпіліс әкелді.

Бұл ашылу 1915 жылы Уильям Лоуренс Брагг пен Уильям Генри Брэггке физика саласы бойынша Нобель сыйлығын жеңіп алуға мүмкіндік берді. Осылайша, Брэгг эффектісі тек кристалдарды зерттеу үшін ғана емес, сонымен қатар оптикалық жүйелерде сигналдарды басқару және тарату үшін де қолданылуға негіз болды.

Брэгг эффектісі бастапқыда рентгендік кристаллография саласында қолданылғанымен, уақыт өте келе оптика саласына да енгізілді. Брэгг эффектісі мен оның принциптері оптикалық талшықтарда қолдану үшін жаңа мүмкіндіктер ашты. XX ғасырдың екінші жартысында Брэгг торларын оптикалық талшықтарда пайдалану басталды.

1978 жылы Кен Хилл және оның әріптестері Канададағы телекоммуникация зерттеу орталығында Брэгг принципін оптикалық талшықтарда қолдануды зерттей бастады. Олар талшықтарды ультракүлгін сәулемен сәулелендіріп, ішінде мерзімді құрылымдар қалыптастыруға қол жеткізді. Бұл процесс талшықтың сыну көрсеткішінің белгілі бір аймақтарда өзгеруіне әкеліп, Брэгг торларын құруға мүмкіндік берді. Брэгг торлары жарықтың белгілі бір толқын ұзындығын шағылыстыру қасиетіне ие болып, оларды сенсорлық және телекоммуникациялық жүйелерде қолдануға жол ашты.

Брэгг торларының негізгі ерекшелігі – олардың белгілі бір толқын ұзындығын таңдауға және оны шағылыстыруға қабілеттілігі. Бұл қасиет оптикалық жүйелерде жарықты сүзгілеу, толқын ұзындығын тұрақтандыру және физикалық параметрлерді, мысалы, температура, қысым мен деформацияны өлшеу үшін өте тиімді.

1.2.1 Брэгг торлары негізіндегі сенсорлардың дамуы және қолданылуы

Брэгг торлары оптикалық талшықтардағы жарық толқынының ұзындығына сезімтал қасиеттерімен ерекшеленеді, бұл олардың сенсор ретінде қолданылуына мүмкіндік береді. Олар қоршаған ортадағы әртүрлі

параметрлердің өзгерістеріне жауап ретінде сыну көрсеткішін және тордың құрылымын өзгертіп, жарықтың шағылысу сипаттамаларын өзгертеді. Бұл процесс сыртқы факторларды дәл өлшеуге мүмкіндік береді.

Бұл торлар температура мен механикалық деформацияларды өлшеу үшін кеңінен пайдаланылады. Олар әсіресе құрылымдық мониторингте маңызды, мысалы, көпірлер мен ғимараттардың қауіпсіздігін бақылау үшін қолданылады. Бұған қоса, Брэгг торлары өнеркәсіптік процестерді бақылауда, сондай-ақ медициналық құрал-жабдықтар мен ғылыми зерттеулерде өте тиімді. Брэгг торларының дәлдігі мен сенімділігі оларды осы салаларда таптырмас құрал етеді.

Телекоммуникация саласында да Брэгг торлары ерекше маңызға ие. Олар толқын ұзындығын тұрақтандыру және оптикалық сигналды сүзгілеу үшін пайдаланылады. Бұл олардың жоғары жылдамдықта және деректердің жоғалуысыз байланыс орнатуға мүмкіндік береді, сондықтан Брэгг торларының қолданылуы қазіргі заманғы телекоммуникациялық жүйелерде маңызды рөл атқарады.

Брэгг торларының негізгі артықшылықтарының бірі олардың жоғары дәлдігі мен сезімталдығы болып табылады. Олар өте кішкентай өзгерістерді анықтай алады және әртүрлі орта жағдайларында тиімді жұмыс істей алады. Бұған қоса, Брэгг торлары электромагниттік кедергілерге төзімді, бұл оларды қиын жұмыс жағдайларында да қолдануға мүмкіндік береді.

Тағы бір маңызды артықшылығы – олардың ықшамдығы және көп функциялылығы. Брэгг торлары бір уақытта бірнеше параметрді өлшеуге қабілетті, бұл оларды инженерлік және өнеркәсіптік салаларда тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Олар оптикалық жүйелердегі негізгі компоненттерге айналды. Брэгг торларының даму тарихы рентгендік дифракция заңынан басталып, қазіргі заманғы оптикалық талшықтардағы күрделі құрылымдарға дейін жетті.

Бұл сенсорлар температураны, қысымды және басқа да физикалық параметрлерді өлшеуге арналған жоғары дәлдікті құрылғылар ретінде кеңінен қолданылып келеді. Олар телекоммуникация саласында сигнал сапасын арттыру және байланыс жүйелерінің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін де пайдаланылуда. Брэгг торларының жоғары сезімталдығы мен сенімділігі, сонымен қатар әртүрлі салалардағы көпжақты қолданылуы оларды заманауи технологиялардың маңызды құрамдас бөлігі етеді.

Брэгг оптикалық торлары технологиясының дамуы олардың дизайнын жетілдіруге мүмкіндік берді. Фотолиитография және голографиялық экспозиция әдістерін пайдалану арқылы дәлірек және күрделі торларды жасау мүмкіндігі туды. Бұл жетістіктер Брэгг торларының түрлі салаларда кеңінен қолданылуына жол ашты. Жоғары дәлдіктегі және күрделі торлардың өндірісі олардың байланыс, датчиктер жасау және құрылымдық денсаулық мониторингі сияқты салаларда қолданысын айтарлықтай кеңейтті [48].

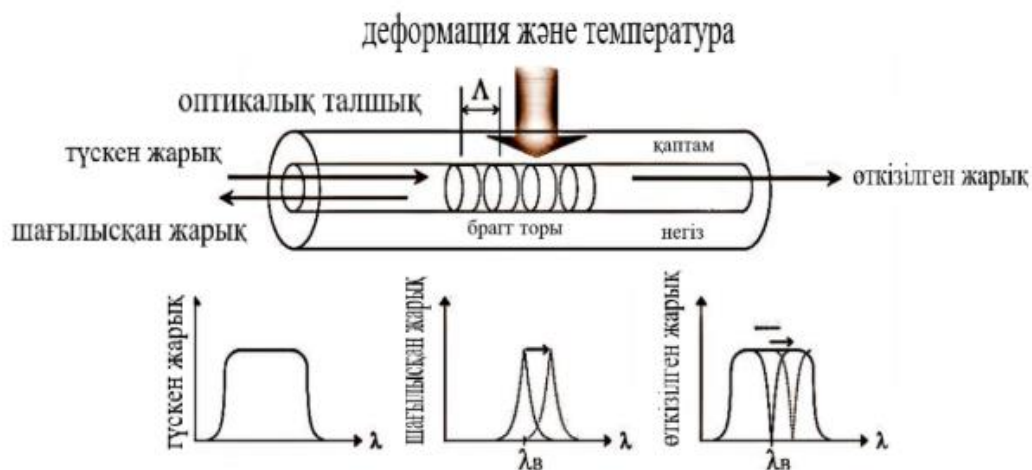
Телекоммуникация – дисперсияны сүзу, дуплекстеу және өтеу үшін талшықты-оптикалық жүйелерде қолданылады.

Сенсорлар – өнеркәсіптік және ғылыми қосымшаларда температура, деформация және қысымды қоса алғанда, әртүрлі физикалық шамаларды өлшеу үшін қолданылады.

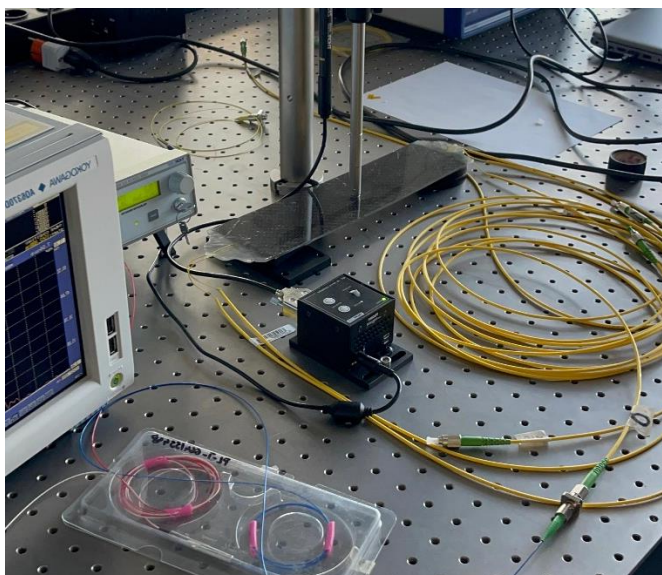
Лазерлер – талшықты лазерлер мен күшейткіштерде шағылысатын элементтер ретінде қолданылады.

Қазіргі жетістіктер соңғы жылдары Брэгг торларының дамуы дамып келеді. Заманауи технологиялар жоғары дәлдіктегі параметрлермен торлар жасауға мүмкіндік береді, бұл оларды қолданудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Брэгг торының даму тарихы іргелі физикалық ашылудың маңызды технологиялық инновацияларға қалай әкелетінін және ғылым мен техниканың әртүрлі салаларына қалай әсер ететінін көрсетеді. Алғашқы рентгендік эксперименттерден бастап қазіргі заманғы жоғары дәлдіктегі оптикалық құрылғыларға дейін Брэгг торлары зерттеулер мен өнеркәсіпте маңызды құрал болып қала береді.



1.4 - сурет – Талшықты-оптикалық Брэгг торларының жұмыс жасау принциптері



1.5 - сурет – Брэгг торы 1560 нм диапазонындағы оптикалық кабель

1.3 Қолданыстағы деформацияны бақылау тәсілдеріне жалпы шолу

Бетондағы деформацияларды бақылау құрылыс саласында өте маңызды, себебі бұл құрылымдардың сенімділігі мен беріктігін анықтайды. Бетондағы деформацияларды өлшеудің бірнеше әдісі бар, оның ішінде дәстүрлі және жаңа технологиялар қолданылады. Негізгі әдістерді қарастырайық:

Механикалық әдістердің ішінде стрейн-гейдждер (жүктеме ұяшықтары) бетонның деформациясын өлшеудің кең тараған тәсілі болып табылады. Олар бетонның бетіне орнатылатын сезімтал элементтерден тұрады. Бетондағы деформация кезінде стрейн-гейдждің электр кедергісі өзгереді, бұл өз кезегінде кернеу мен деформацияның мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді.

Дилатометрлер бетон үлгілерінің ұзындығының өзгеруін өлшеуге арналған құралдар болып табылады. Олар әртүрлі жүктемелер кезінде бетонның көлемінің өзгерісін анықтайды және механикалық (контактілі) немесе оптикалық (контактсіз) болуы мүмкін.

Оптикалық әдістердің арасында интерферометрия жарық толқындарының интерференциясы арқылы объектілердің ұзындығы немесе пішініндегі өзгерістерді өлшеуге арналған. Бұл әдіс жоғары дәлдікпен жұмыс істейді, бірақ сыртқы факторларға сезімтал болуы мүмкін.

Фотограмметрия нысанды әртүрлі бұрыштардан түсіруді және үш өлшемді модельді алу үшін кескіндерді өңдеуді қамтиды. Бұл әдіс үлкен беттерде және жету қиын жерлерде деформацияларды басқаруға мүмкіндік береді.

Талшықты-оптикалық әдістер бойынша датчиктер деформацияның әсерінен оптикалық талшықтың жарық сигналдарының қасиеттерінің өзгеруіне негізделеді. Бұл сенсорлар үлкен қашықтықта және күрделі

жағдайларда деформацияларды дәл өлшеуге мүмкіндік береді. Брэгг торлары (FBG) оптикалық талшықтардағы деформацияны өлшеудің жоғары дәлдігімен ерекшеленеді. Олар талшықтың деформациясы нәтижесінде шағылысқан толқын ұзындығын өзгерту арқылы кернеу мен деформация деңгейін анықтауға мүмкіндік береді [49, 50, 51].



1.6 - сурет – Жарылған бетон конструкциясы

Электромагниттік әдістер арасында Эдди-ток датчиктері бетонның электр өткізгіштігін өлшеу үшін айнымалы магнит өрісін пайдаланады. Бұл сенсорлар көбінесе бетонның сапасын бақылау және жарықтарды анықтау үшін қолданылады.

Ультрадыбыстық әдіс бетонның ішкі құрылымын зерттеу үшін ультрадыбыстық толқындарды қолданады. Бұл толқындардың өтуіндегі өзгерістер бетондағы ақаулар мен деформацияларды анықтауға көмектеседі.

Акустикалық эмиссия әдісі бетондағы жарықтар мен деформациялар пайда болған кезде шығатын жоғары жиілікті дыбыс толқындарын тіркеуге негізделген. Бұл әдіс зақымдануларды ерте кезеңдерде анықтауға мүмкіндік береді, бұл құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды.

Қолданылып жатқан датчиктердің барлығы бетон құрылымындағы деформацияны анықтап, оның алдын алу үшін маңызды рөл атқарады. Бетон конструкцияларында жиі жарықтар пайда болады, олардың шамамен 20%-ы жүктемелерден туындайды, ал қалғандары басқа себептерден орын алады. Жарықтардың көп бөлігі шөгудің, құрылыс кезінде ылғалданудың, біркелкі емес қызудың, қатаюдың баяу жүруінің, температуралық деформациялардың және кейінгі кезеңдердегі жүктемесіз деформацияның әсерінен пайда болады. Бұл жарықтар бетонның беріктігін айтарлықтай төмендетіп, оның ұзақ мерзімді тұрақтылығына қауіп төндіреді [52].

Бетон конструкцияларының беріктігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін жарықтардың пайда болуын және олардың даму процесін бақылау өте

маңызды. Жүктемелерден туындаған жарықтарға қарағанда, жүктелмеген жарықтар, әсіресе шөгінділер, практикалық тұрғыдан шешілуі тиіс. Себебі олар бетонның құрылымдық қасиеттеріне үлкен әсер етеді, әсіресе құрылыс аяқталғаннан кейінгі кезеңдерде. Сондықтан жарықтарды бақылау және оларды ерте кезеңде анықтау құрылымдардың қауіпсіздігін сақтауға және ұзақ мерзімді беріктігін қамтамасыз етуге көмектеседі.

Талшықты-оптикалық сенсорлар (FOS) құрылыс индустриясында құрылымдардың әртүрлі параметрлерін өлшеуде маңызды рөл атқарады. Олар құрылымдардың физикалық және химиялық қасиеттерін дәл анықтауға мүмкіндік береді. FOS көмегімен өлшенетін басты параметрлердің бірі – оптикалық талшық арқылы өтетін жарық қарқындылығының өзгерісі. Бұл өзгерістер талшықтағы иілу мен оның радиусындағы ауытқуларға байланысты болады. Талшықтың қисықтығы өзгергенде, жарықтың қарқындылығы да өзгереді, бұл иілуден туындайтын қисықтық радиусымен тығыз байланысты [53, 54].

FOS әртүрлі конфигурацияларда қолданылады және әр конфигурацияның өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Белгілі бір конфигурацияның таңдалуы қолданбаның нақты талаптарына тәуелді. Осы механизмдердің көмегімен құрылыс құрылымдарындағы иілуді жоғары дәлдікпен өлшеу мүмкін болады.

Осылайша, талшықты-оптикалық сенсорлар құрылыс құрылымдарының күйін бақылауда өте тиімді құрал болып табылады. Олар құрылыс процесінің қауіпсіздігін қамтамасыз етуге, құрылымдардың беріктігін арттыруға және құрылыс жұмыстарының тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді.

1.4 Талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс істеу принципі

Талшықты-оптикалық сенсорлар әртүрлі физикалық параметрлерді, мысалы, температура, қысым және деформация сияқты көрсеткіштерді өлшеу үшін оптикалық талшықтарды пайдаланады. Бұл сенсорлар сыртқы факторлардың әсерінен оптикалық талшық арқылы өтетін жарық сигналдарының сипаттамаларының өзгеруіне негізделеді [55]. Сенсорлардың жұмыс принципі осы өзгерістерді дәл анықтауға негізделген.

Негізгі компоненттерге жарық көзі жатады, ол оптикалық талшыққа жарық сигналын жібереді. Көбінесе лазерлер мен жарық диодтары пайдаланылады. Оптикалық талшық – бұл жарық сигналының тасымалдаушысы, және ол бір режимді немесе көп режимді болуы мүмкін, бұл қолданбаға байланысты өзгереді. Модулятор – қоршаған ортадағы физикалық өзгерістерге жауап ретінде жарық сигналын өзгертуге жауапты компонент. Детектор өзгертілген жарық сигналын қабылдап, оны электрлік сигналға түрлендіреді, содан кейін өңдеу құрылғысы бұл сигналды талдайды және оны өлшенетін параметрлермен сәйкестендіреді.

Жарық қарқындылығының өзгеруі түрлі себептермен болуы мүмкін, мысалы, талшықтың иілуі, микрожарықтардың пайда болуы немесе талшықтың сіңіру коэффициентінің өзгеруі. Мысалы, талшық деформацияланса немесе иілсе, жарықтың бір бөлігі жоғалып, шығатын сигналдың қарқындылығы өзгереді.

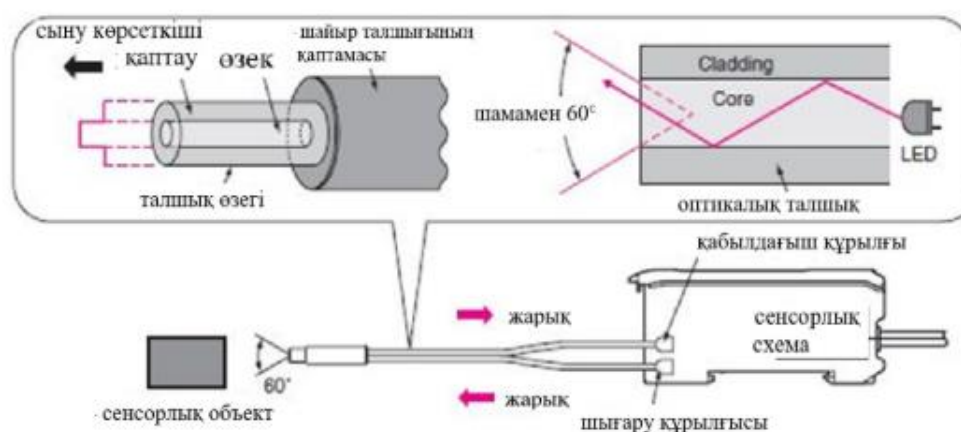
Брэгг торлары оптикалық талшықта жарықты белгілі бір толқын ұзындығында шағылысатын периодты құрылымдар ретінде жасалады. Бұл торлар температура немесе деформация өзгергенде құрылымдық параметрлерін өзгертеді, нәтижесінде шағылысқан толқын ұзындығы ауысады. Бұл құбылыс физикалық параметрлерді жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді.

Фазалық модуляция оптикалық талшықтағы жарықтың оптикалық жолының өзгеруі нәтижесінде пайда болады, бұл сыртқы әсерлердің әсерінен орын алады [56]. Мысалы, Майкельсон интерферометрі немесе Фабри-Перо интерферометрі сияқты құрылғылар фазалық өзгерістерді өлшеу үшін қолданылады, бұл қысым, діріл немесе басқа механикалық өзгерістерді дәл анықтауға көмектеседі.

Сонымен қатар, оптикалық талшықтағы жарықтың поляризациясы механикалық деформациялар немесе магнит өрістерінің әсерінен өзгеруі мүмкін. Поляризация өзгерістерін талдау арқылы қысым, кернеу және басқа физикалық параметрлерді өлшеуге болады. Талшықты-оптикалық сенсорлар жоғары сезімталдық пен дәлдікке ие, олар физикалық параметрлердегі кішкентай өзгерістерді өлшей алады. Бұл сенсорлар электромагниттік кедергілерге ұшырамайды, сондықтан оларды күрделі жағдайларда қолдану өте тиімді болып табылады.

Оптикалық талшықтардың кіші диаметрі және икемділігі оларды қол жетімсіз жерлерде орнатуға мүмкіндік береді. Бұл ерекшеліктер олардың орнатылуын жеңілдетеді және кең ауқымды қолдануларға жарамды етеді. Сонымен қатар, талшықты сенсорлар химиялық және физикалық әсерлерге жоғары төзімділік көрсетеді, бұл олардың ұзақ уақыт бойы қызмет етуіне ықпал етеді [57, 58].

Талшықты-оптикалық сенсорлар әртүрлі физикалық параметрлерді өлшеуде тиімді және сенімді шешімдер ұсынады. Олардың жұмыс принципі жарық сигналдарының сыртқы әсерлерге жауап ретінде өзгеруіне негізделген, бұл өлшеудің жоғары дәлдігі мен сенімділігін қамтамасыз етеді. Мұндай сенсорлар температура, қысым, деформация және басқа параметрлердің өзгерістерін дәл анықтай алады. Олардың негізгі артықшылығы — сыртқы факторлар әсерінен өзгерген жарық сигналдарының өзгерісін тіркеу арқылы өлшеу. Бұл оптикалық сенсорлар әсіресе қиын жағдайларда қолдануға өте тиімді, себебі олар электромагниттік кедергілерге ұшырамайды. Талшықты-оптикалық сенсорлардың осы қасиеттері оларды түрлі салаларда, әсіресе құрылыс, экология және өнеркәсіп салаларында пайдалану үшін өте қолайлы етеді.



1.7 - сурет – Талшықты-оптикалық сенсордың жұмыс принципі

Талшықты-оптикалық сенсорлар екі негізгі жұмыс принципі бойынша бөлінеді: нақты сенсорлар және таратылған сенсорлар.

Нақты сенсорлар өздерінің жұмысында айналарды негізгі элемент ретінде пайдаланады. Бұл айналар жарықтың белгілі бір толқын ұзындығын шағылыстырып, нәтижесінде температура, қысым немесе басқа параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді. Айналар арқылы жарықтың қасиеттерін өзгерту, оны нақты мәндермен байланыстырып, сенсорға сыртқы физикалық факторларды дәл анықтауға жол ашады.

Таратылған сенсорлар, өз кезегінде, талшықтың бүкіл ұзындығында орын алған өзгерістерді бақылауға арналған. Бұл сенсорлар талшықтың әрбір нүктесіндегі температураның немесе басқа физикалық параметрлердің өзгеруін өлшей алады. Олар үлкен аумақтарды бір мезгілде бақылап, түрлі нүктелердегі өзгерістерді анықтауға мүмкіндік береді. Таратылған сенсорлар үлкен аймақтарда мониторинг жүргізуді қажет ететін жобалар үшін өте тиімді, себебі олар барлық жүйе бойынша үздіксіз бақылауды қамтамасыз етеді.

Осы екі типті сенсорлардың ерекшеліктері әртүрлі қолдану жағдайларына арналған нақты шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді, бұл олардың түрлі салаларда тиімді қолданылуын қамтамасыз етеді.



1.8 - сурет – Талшықты-оптикалық датчиктердің түрі

Талшықты-оптикалық сенсорлар бүгінгі таңда әртүрлі өнеркәсіп салаларында кеңінен қолданылады. Олардың қолданылу ауқымы тау-кен өнеркәсібі, мұнай өндіру, энергетика, ғылым және медицина сияқты дәстүрлі салалардан бастап, құрылыс, авиация және коммуникациялар сияқты жаңа бағыттарға дейін жетті.

Тау-кен саласында талшықты-оптикалық сенсорлар жер астындағы жағдайларды бақылауға мүмкіндік береді, бұл кеніштердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Мұнай және газ өнеркәсібінде олар қуыстар мен құбырлардағы қысымды және температураны мониторингте қолданылып, қауіпсіздікті арттырады. Энергетика саласында сенсорлар электр станцияларындағы жабдықтардың жұмысын бақылап, оларды тиімді пайдалану мен үнемдеуге жағдай жасайды.

Ғылымда және медициналық зерттеулерде талшықты-оптикалық сенсорлар нақты уақыт режимінде биологиялық және физикалық параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді, бұл медициналық диагностика мен ғылыми зерттеулерде маңызды рөл атқарады. Авиация мен құрылыс салаларында олар құрылымдардың беріктігін бақылауға, сондай-ақ температура мен деформацияны өлшеуге көмектеседі. Сонымен қатар, коммуникация саласында олар жоғары жылдамдықты деректер беру жүйелерінде сенімділік пен тиімділікті арттырады.

Талшықты-оптикалық сенсорлар осылайша әртүрлі саладағы маңызды мәселелерді шешуге мүмкіндік береді және бұл технологияның қолдану аясы күн санап кеңеюде [59].

1.5 Құрылыс индустриясындағы Брэгг торлары, оларды қолдану және орнату әдістемесі

Құрылыс индустриясында материалдардың беріктігі мен тұрақтылығын бақылау, сондай-ақ олардың мерзімінен бұрын бұзылуын алдын алу мақсатында заманауи технологиялар мен әдістер белсенді түрде енгізілуде. Бұл үдерісте оптикалық сенсорлар мен Брэгг торларының қолданылуы ерекше орын алады. Брэгг торлары, әсіресе құрылыс конструкцияларының деформациялары мен кернеулерін нақты уақыт режимінде бақылау үшін тиімді шешім болып табылады. Брэгг торы — бұл арнайы оптикалық құрылым, оның негізгі жұмыс принципі жарықтың өзара әрекеттесуі мен шағылу құбылыстарына негізделген. Осындай сенсорлар бетон конструкцияларына біріктірілгенде олардың құрылымдық тұтастығы мен беріктігін бақылау мүмкіндігі артады.

Брэгг торлары және олардың принципі бұл оптикалық талшықтағы арнайы жарықтық тор, ол талшықтың ішінде жарықтың белгілі бір ұзындығы бойынша шағылысуын тудырады. Мұндай торлар белгілі бір жиіліктегі жарық сәулелерін жақсы жұтып, олардың сипаттамаларын бақылауға мүмкіндік береді. Брэгг торы өзінің құрылымдық ерекшеліктері бойынша жарықтың шағылу жиілігін өзгертеді, бұл кернеу мен деформацияның өзгеруіне байланысты болады. Брэгг торларының бұл қасиеті құрылыс конструкцияларындағы кернеу мен деформацияны өлшеу үшін тиімді түрде қолданылады.

Брэгг торларын орнату әдістемесі өте маңызды, өйткені дұрыс орнату сенсорлардың дәлдігі мен тиімділігіне тікелей әсер етеді. Бұл процесс бірнеше кезеңдерден тұрады:

Бетон құрылымын дайындау - Брэгг торларын бетон конструкциясына орнату алдында, ең алдымен, бетонның дайындығы мен тұрақтылығы тексерілуі қажет. Бұл кезеңде бетонның беткі қабаты тазартылып, қажет болса тегістеледі. Брэгг торларының орнатылуы бетонның құрылымдық қасиеттеріне кедергі келтірмей, оларды дәл бақылауды қамтамасыз етуі керек.

Талшықты оптикалық кабельдің таңдалуы - Брэгг торларын орнату үшін талшықты оптикалық кабельдер пайдаланылады. Бұл кабельдер арнайы жарық өткізетін қасиеттері бар және олардың ішінде Брэгг торы қалыптастырылады. Кабельдің түрі мен ерекшеліктері оның орнатылатын орнына байланысты таңдалады. Талшықты оптика кабельдерінің сипаттамалары сенсордың жоғары сезімталдығын қамтамасыз етеді, сондай-ақ оларды бетонда қолдануға жарамды ету үшін қосымша қорғаныс қабаттарымен жабдықталуы мүмкін.

Торды орнату - кезінде, ең алдымен, Брэгг торы талшықты оптика кабеліне арнайы түрде қалыптастырылады. Кейін бұл тор бетон конструкциясының қажетті бөліктеріне орналастырылады. Брэгг торы бетонның құрылымына ықтимал жүктемелер мен деформациялар әсерінен динамикалық өзгерістерге бейім болуы керек, сондықтан оның дұрыс орнатылуы сенсорлардың дәл өлшеуін қамтамасыз етеді.

Жабдықтау жүйесін қосу - орнатылған Брэгг торларын бақылау үшін арнайы жабдықтар мен өлшеу жүйелері қажет. Бұл жабдықтар торлардың шығарған сигналдарын қабылдап, оларды өңдейді, нәтижесінде құрылыс конструкциясындағы кернеу мен деформация туралы нақты мәліметтер беріледі. Жүйенің жұмыс істеуі үшін оның компоненттері дұрыс қосылып, калибрленуі керек.

Сынақ және калибрлеу - жабдықты орнатқан соң, Брэгг торларының жүйесін сынақтан өткізу қажет. Бұл кезеңде жүйе нақты уақыт режимінде жұмыс істейтінін, сенсорлардың дұрыс көрсеткіштер беретінін және құрылымдағы деформациялар мен кернеулерді дәл анықтайтынын тексеру керек.

Брэгг торларының бетон конструкцияларына біріктіру әдістемесі де бірнеше маңызды кезеңдерден тұрады:

Кабельді бетонға біріктіру - Брэгг торларын бетон конструкциясына біріктіру процесі өте мұқият жүргізілуі тиіс. Оптикалық кабель бетонға дәнекерлеу немесе арнайы жабыстыру әдісі арқылы біріктіріледі. Мұндай біріктіру әдісінің артықшылығы – сенсордың құрылымға толық үйлесімді түрде бекітілуі және сыртқы әсерлерден қорғалу мүмкіндігі.

Арматуралық жүйемен біріктіру – кейде Брэгг торларын бетон конструкцияларына арматуралық жүйелер арқылы біріктіру ұсынылады. Арматура жүйесі Брэгг торын нығайтып, оның кернеу мен деформацияны дұрыс бақылауын қамтамасыз етеді. Бұл әдіс сенсордың тұрақтылығын арттырып, оның қызмет мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

1.5.1 Нанотехнологиялар және жаңа материалдарды қолдану

Жаңа наноматериалдар мен технологиялар Брэгг торларын бетон конструкцияларына біріктіруде қолданылуы мүмкін. Мұндай материалдар сенсорлардың сезімталдығын арттырып, құрылымның сыртқы әсерлерге қарсы төзімділігін жақсартады.

Брэгг торларының біріктірілген бетон конструкциясындағы жұмысын бақылау үшін мониторинг жүйелері мен бағдарламалық құралдарды интеграциялау қажет. Бұл жүйелер нақты уақыт режимінде конструкциядағы жағдайды бақылап, қажетті шараларды қабылдауға мүмкіндік береді. Мониторингтің үздіксіз жүргізілуі бетон конструкцияларының қауіпсіздігін қамтамасыз етеді және олардағы сыну немесе деформация белгілерін уақытында анықтауға мүмкіндік береді.

Осы бөлім бойынша қорта келгенде Брэгг торларын орнату және бетон конструкцияларына біріктіру әдістемесі құрылыс саласында жаңа мүмкіндіктер ашуға жол береді. Бұл әдіс тек құрылымдық тұрақтылықты бақылап қана қоймай, сонымен қатар қауіпсіздікті арттыруға да мүмкіндік береді. Брэгг торларының бетон конструкцияларында қолданылуы ұзақ мерзімді зерттеулер мен тәжірибелерге негізделген жоғары дәлдікті өлшеу құралдары ретінде құрылыс саласында кеңінен қолданысқа енуде.

2 Брэгг торларын орнату және бетон конструкцияларына интеграциялау әдістері

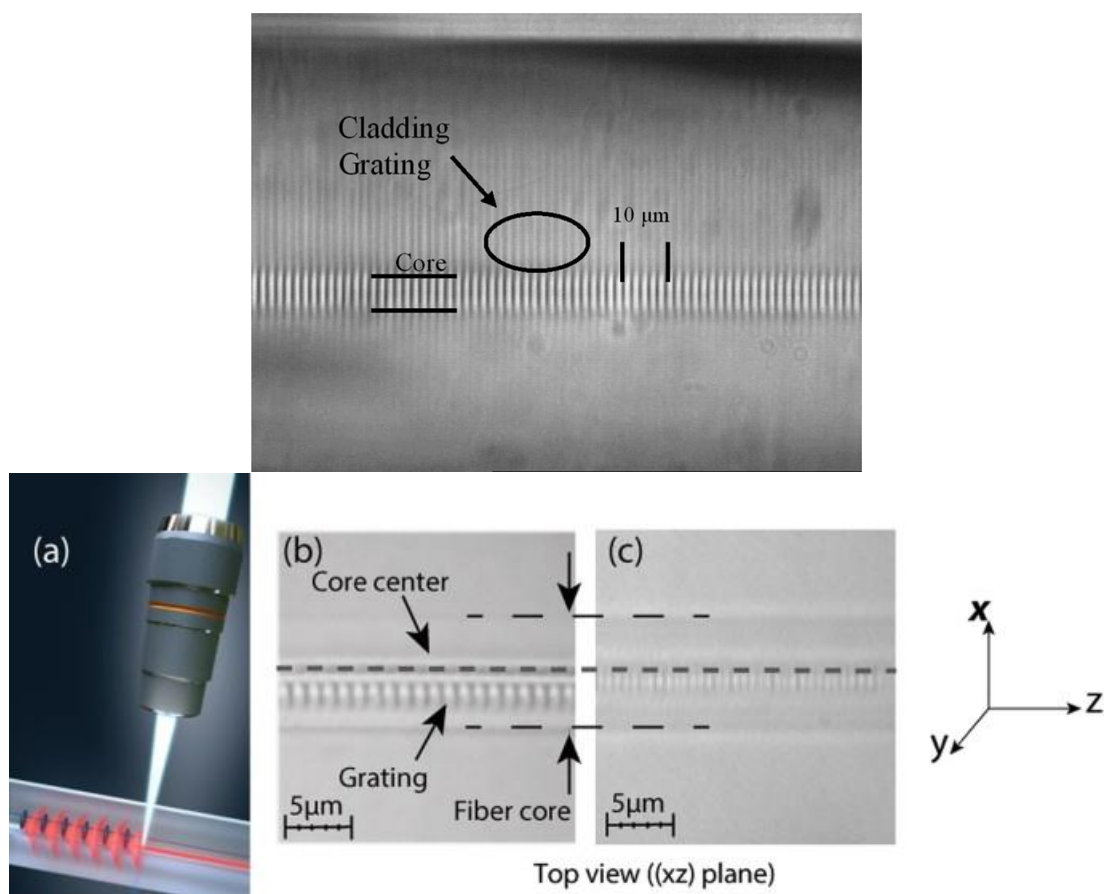
Брэгг торларын бетон конструкцияларына енгізу құрылымдардың күйін және техникалық көрсеткіштерін нақты уақытта бақылауға мүмкіндік береді. Бұл мақсатта сенсорларды дұрыс орнату және біріктіру өте маңызды, себебі ол өлшеу дәлдігін қамтамасыз етеді. Осы процесті жүзеге асыру үшін бірнеше кезеңдер қарастырылады. Брэгг торларын дайындау кезінде оптикалық талшықтар таңдалады, оларда Брэгг торлары (FBG) болуы керек. Әдетте, өлшеу дәлдігін арттыру үшін бір режимді талшықтар қолданылады. Сенсорларды орнатар алдында әрбір Брэгг торы калибрленеді, бұл температура мен деформацияның әсерінен өзгеретін бастапқы параметрлер мен түзетулерді анықтауға мүмкіндік береді. Калибровка процесі сенсорлардың сенімділігін қамтамасыз етіп, нақты өзгерістерді өлшеу үшін қажетті дәлдік пен қателіктерді азайтуға көмектеседі. Брэгг торларының көмегімен бетон конструкцияларының жағдайын бақылау құрылыс саласында қауіпсіздікті қамтамасыз ету және құрылымдық бұзылуларды алдын алу үшін маңызды құралға айналады.

Талшықты-оптикалық сенсорлардың тиімді жұмыс істеуі үшін оларды сыртқы қорғаныс қабаты арқылы қорғау қажет, өйткені оптикалық талшықтар механикалық зақымдардан және химиялық әсерлерден сақталуы керек. Құрылымды орнату процесінде сенсорларды дұрыс орналастыру маңызды. Бұл үшін бетонның маңызды және ауыр жүктемелер түсетін аймақтарын немесе болжамды жарықтар мен басқа да деформациялар орын алатын жерлерді таңдау қажет. Брэгг торлары бар сенсорлар қымбат болғандықтан, оларды орнату кезінде арнайы қорғаныс шаралары қажет, мысалы, шаң мен кірден қорғау және сенімді байланыс пен адгезияны қамтамасыз ету үшін беттерді тазарту. Сенсорларды орнату екі тәсілмен жүзеге асырылады: беттік орнату және тікелей бетонға енгізу. Беттік орнату кезінде Брэгг торларын бетон бетіне эпоксидті шайырлар немесе арнайы желімдер арқылы бекітуге болады, бұл сенсордың бетіне мықтап орнығуын қамтамасыз етеді. Ал бетонға енгізу әдісі кезінде Брэгг торлары бетон құйылмас бұрын қалыптың ішіне орналастырылады, бұл құрылымдағы деформацияларды дәл бақылауға мүмкіндік береді. Бұл әдістер сенсорлардың дәл жұмыс істеуін және бетон конструкцияларының жағдайын тиімді бақылауды қамтамасыз етеді.

Оптикалық талшықтарды кабельдік арналар арқылы орнату кезінде оларды деректерді жинау және өңдеу орнына беру үшін арнайы қорғаныс түтіктері немесе арналар орнатылады. Талшықтарды механикалық зақымданудан және сыртқы ортаның теріс әсерінен қорғау өте маңызды. Талшықтар мен қосылыстарды ылғалдан және басқа агрессивті факторлардан қорғау үшін оларды тығыздау қажет, ол үшін тығыздағыштар немесе қорғаныс қақпақтары қолданылады. Орнату барысында оптикалық талшықтар деректерді оқу және талдау үшін спектрометрлер немесе басқа өлшеу

құрылғыларына қосылады. Бұл қосылымда жоғары сапалы қосқыштарды пайдалану және сенімді контактіні қамтамасыз ету өте маңызды. Сенсорлар орнатылып, қосылғаннан кейін жүйені калибрлеу қажет, бұл бастапқы параметрлерді анықтап, ықтимал ауытқуларды түзетуге мүмкіндік береді. Деректерді бақылау және талдау үшін арнайы компьютерлік бағдарлама арқылы нәтижелер мен деректерді жинау жүйесі құрылымның күйі туралы ақпаратты үздіксіз немесе кезең-кезеңімен жинап отырады. Өлшемдер толқын ұзындығының деформациялармен және температураның өзгеруімен байланысты өзгерістерді қамтиды. Алынған деректер кейін мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы талданып, ауытқуларды анықтауға, болашақ зақымдарды болжауға және оларды болдырмауға арналған шаралар қабылдауға мүмкіндік береді [18].

Брэгг торларын бетон конструкцияларына интеграциялау мұқият дайындықты және орнату процесінің әрбір кезеңін дәл орындауды талап етеді. Сенсорлардың дұрыс орнатылуы мен калибрленуі бұл құрылымдардың жағдайын тиімді қадағалауға және ықтимал проблемаларды уақытында анықтауға мүмкіндік береді.



2.1 - сурет – Брэгг торларын бетон конструкцияларына біріктіру кезіндегі тікелей енгізу

2.1 Бетон конструкцияларының деформацияға ұшырау себептері мен жағдайлары

Бетон конструкциялары жұмыс кезінде әртүрлі деформацияларға ұшырауы мүмкін. Бұл деформациялар әртүрлі факторлардың әсерінен туындайды және олар ішкі мен сыртқы деп бөлінеді. Деформациялардың себептерін және туындайтын қиындықтарды түсіну бетонның беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін маңызды.

Бетон конструкциясының деформациялары механикалық және статикалық жүктемелердің әсерінен болуы мүмкін. Бұл тұрақты жүктемелерге құрылымның өз салмағы, жабдықтары және басқа құрылыс элементтері жатады. Температураның өзгеруі деформацияның негізгі факторы болып табылады, өйткені қоршаған ортаның температурасы тәуліктік және маусымдық ауытқуларға ұшырайды. Сонымен қатар, күн сәулесі мен ылғалдану процестері ішкі жылу көздеріне жатады, олар бетонның кептіру процесінде шөгу мен ылғалдың жоғалуына әкеліп, оның кішіреюіне әсер етеді. Ылғалдың әсері бетонның ғана емес, арматураның да коррозиясына алып келуі мүмкін.

Температуралық ауытқулар мен біркелкі емес қыздыру нәтижесінде температуралық жарықтар пайда болады, ал механикалық әсерлерге байланысты механикалық жарықтар да пайда болуы мүмкін. Жүктемелердің әсерінен ұзақ уақыт бойы деформациялар бетонның беріктігін жоғалтуына себеп болады. Тығыздаудың жеткіліксіздігі кезінде бетонның біркелкі төселмеуі макро және микро жарықтардың пайда болуына әкеледі [60].

2.2 Құрылымдарда қолданылатын сенсорлардың ерекшеліктері

Құрылыс саласында құрылымдардың қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз ету – басты міндеттердің бірі болып табылады. Бүгінгі таңда құрылыс индустриясында конструкциялардың жағдайын нақты бақылау және оларды басқару үшін әртүрлі әдістер мен технологиялар белсенді түрде пайдаланылады. Осы мақсаттарға жету үшін құрылымдық мониторинг жүйелерінде сенсорлар маңызды құрал болып табылады. Сенсорлар құрылымдағы әртүрлі параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді, мысалы, деформациялар, кернеулер, температура өзгерістері және басқа да физикалық немесе химиялық көрсеткіштер. Бұл тарауда құрылымдарда қолданылатын сенсорлардың әртүрлі түрлері, олардың жұмыс принциптері мен ерекшеліктері қарастырылады.

Сенсорлар – белгілі бір физикалық немесе химиялық параметрлерді өлшейтін құралдар, олар құрылымдық элементтердің күйін бақылап, мүмкін болатын ақауларды алдын ала анықтауға мүмкіндік береді. Сенсорлар әртүрлі жұмыс принциптеріне негізделген болуы мүмкін. Олардың ішінде негізгі типтерді төмендегідей бөлуге болады: механикалық, электрлік, термиялық

және оптикалық сенсорлар. Механикалық сенсорлар құрылымдардың механикалық өзгерістерін, мысалы, деформациялар мен кернеулерді өлшейді. Электрлік сенсорлар электрлік қасиеттердегі өзгерістерді, мысалы, кедергі, ток немесе кернеу өзгерістерін бақылауға мүмкіндік береді. Термиялық сенсорлар температураның өзгеруін анықтауға арналған, ал оптикалық сенсорлар жарық сигналының өзгерістеріне негізделген. Әрбір сенсордың өз ерекшеліктері мен артықшылықтары бар, бұл оларды нақты құрылымдық мониторинг үшін тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Механикалық сенсорлар құрылымдардағы механикалық қасиеттерді өлшеуге арналған және негізінен материалдардағы деформацияларды, кернеулерді, қысымдарды және күштерді бақылауға мүмкіндік береді. Мысалы, тензометрлер – бұл сенсорлар, олар құрылымның деформациясын өлшеп, материалдардың созылу немесе сығылу әрекеттеріне жауап береді. Бұл сенсорлар құрылымдардағы физикалық өзгерістерді тіркеп, оларды мониторинг жүйелеріне жібереді. Механикалық сенсорлардың басты артықшылығы олардың қарапайымдылығы мен сенімділігінде. Олар құрылымдық өзгерістерді дәл анықтай алады және ұзақ уақыт бойы жұмыс істейді. Алайда, бұл сенсорлардың кейбір кемшіліктері де бар. Олар температура, ылғалдылық және қоршаған ортаның басқа да факторларынан әсер етуі мүмкін, бұл олардың жұмыс нәтижелерінің дәлдігіне теріс әсер етеді. Сондықтан механикалық сенсорлар қолданылатын орта мен жағдайларды мұқият бақылау қажет. Сонымен қатар, бұл сенсорлар сыртқы әсерлерге сезімтал болғандықтан, олардың орнатылуы мен пайдалануына арнайы талаптар қойылады.

Электрлік сенсорлар материалдардың физикалық қасиеттеріндегі өзгерістерге байланысты туындайтын электрлік өзгерістерді өлшеуге негізделген. Олар көбінесе электрлік кедергіні, сыйымдылықты немесе индуктивтілікті бақылауға арналған. Мысалы, пьезорезистивті сенсорлар механикалық кернеудің әсерінен электрлік кедергілерін өзгерту арқылы жұмыс істейді, сондықтан олар құрылымдардың күйін бақылау үшін тиімді түрде қолданылады. Электрлік сенсорлар жоғары дәлдікті өлшеулерді қамтамасыз етеді, бұл оларды көптеген инженерлік және ғылыми қолданбаларда таптырмас құрал етеді. Дегенмен, олар электрлік шудан немесе басқа электромагниттік өрістерден әсер етуі мүмкін, бұл өлшеулердің дәлдігіне теріс әсер етуі ықтимал. Осы себепті электрлік сенсорларды қорғау үшін арнайы технологиялар мен жүйелерді қолдану қажет. Мысалы, оларды қорғау үшін экрандалған кабельдер немесе қорғаныс корпусын пайдалану сияқты шаралар қабылдануы мүмкін. Электрлік сенсорлар қолданылатын жағдайда оларды сыртқы әсерлерден қорғау, сондай-ақ сенсорлардың жұмыс принципіне сәйкес дұрыс калибрлеу өте маңызды.

Термиялық сенсорлар температураның өзгеруін өлшеу үшін пайдаланылады. Олар құрылымдардағы температуралық ауытқуларды бақылап, материалдардың термиялық қасиеттері мен жұмыс жағдайларын анықтай алады. Бұл сенсорлар, әсіресе температураның әсерінен

материалдарда деформация немесе сыну мүмкін болған кезде маңызды рөл атқарады. Термиялық сенсорлардың басты артықшылығы олардың қарапайымдылығы мен жоғары төзімділігі болып табылады, бұл оларды ұзақ уақыт бойы жұмыс істейтін құрылымдық мониторинг жүйелерінде қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олар құрылымдардағы температуралық өзгерістерді тиімді бақылап, қажетті алдын алу шараларын қабылдауға көмектеседі. Алайда, термиялық сенсорлар тек температураның параметрлерін бақылауға арналған және басқа физикалық немесе химиялық өзгерістерді анықтау үшін қосымша сенсорларды қажет етеді. Осы себепті, толық құрылымдық мониторинг жүйесі үшін бірнеше түрлі сенсорларды интеграциялау қажет болуы мүмкін. Бұл сенсорлардың деректерін талдау құрылымдардың жалпы жағдайын және олардың жұмыс тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Оптикалық сенсорлар, әсіресе талшықты-оптикалық датчиктер соңғы жылдары құрылыс саласында кеңінен қолданыла бастады. Брэгг торлары негізіндегі оптикалық сенсорлар құрылымдардағы кернеулер мен деформацияларды жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл сенсорлардың негізгі артықшылығы – олар сыртқы электромагниттік өрістерден әсер алмайды және өте жоғары сезімталдыққа ие. Сондай-ақ, оптикалық сенсорлар қоршаған ортаның әсеріне төзімді болып келеді, бұл олардың ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз етеді. Олардың беріктігі мен сенімділігі құрылымдық мониторинг жүйелері үшін өте маңызды факторлар болып табылады. Оптикалық сенсорлар үлкен қашықтықтарда жұмыс істей алатындықтан, оларды кең аумақтарда қолдануға болады, бұл құрылымдарды тиімді және дәл бақылауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олар нақты уақыт режимінде деректер жинауға қабілетті, бұл құрылымның жағдайы туралы уақытылы ақпарат алу үшін маңызды. Осы ерекшеліктері арқасында оптикалық сенсорлар құрылыс саласындағы сенімді және тиімді бақылау жүйелерін жасауға мүмкіндік береді.

Құрылымдарға орнатылатын сенсорлардың тиімділігі олардың бірнеше маңызды ерекшеліктеріне байланысты болады. Әрбір сенсор өзінің жұмыс принципіне сәйкес белгілі бір жағдайларда жақсы нәтижелер көрсетеді. Сондықтан сенсорларды дұрыс тандап, орнату құрылымның сенімділігі мен жұмысын бақылауда маңызды рөл атқарады. Сенсорлар әртүрлі физикалық параметрлерді өлшеуге арналғандықтан, олардың әрқайсысы тек өзіне тән шарттарда тиімді жұмыс істейді. Мысалы, механикалық сенсорлар құрылымдардың деформациясын немесе кернеулерін анықтау үшін өте тиімді болса, термиялық сенсорлар тек температураның өзгерісін бақылауға арналды. Сондай-ақ, оптикалық сенсорлар кернеулер мен деформацияларды жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді, бірақ оларды орнату мен пайдалану белгілі бір техникалық талаптарды орындауды қажет етеді. Осылайша, сенсорларды дұрыс тандау, олардың жұмыс шарттарын дұрыс анықтау және орнату құрылымның жұмысын дәл бақылауға мүмкіндік беріп, оның ұзақ мерзімді жұмысын қамтамасыз етеді.

Сенсорлардың дәлдігі мен сезімталдығы құрылымдардың күйін бақылауда маңызды рөл атқарады. Бұл қасиеттер құрылымдағы ең аз өзгерістерді анықтап, қажетті түзетулер жасауға мүмкіндік береді. Мысалы, Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлар құрылымдардағы деформациялар мен кернеулерді жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді. Мұндай сенсорлар, әсіресе, үлкен және күрделі құрылыс объектілерінде тиімді жұмыс істейді, себебі олар өте сезімтал болып табылады және құрылымдардың кез келген кішкентай ақауларын немесе өзгерістерін уақтылы анықтай алады. Дәлдік пен сезімталдықтың жоғары деңгейі сенсорлардың сенімділігі мен жұмыс қабілеттілігін арттырады, бұл құрылыстың ұзақ мерзімді пайдалануын қамтамасыз етеді. Осылайша, сенсорлардың жоғары дәлдігі мен сезімталдығы үлкен құрылымдар мен кешенді жобаларда маңызды фактор болып табылады, себебі олар мүмкін болатын ақауларды немесе бұзылуларды ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде құрылымның қауіпсіздігі мен тиімділігін қамтамасыз етеді.

Құрылымдар әртүрлі климаттық және сыртқы әсерлерге ұшырайды, сондықтан сенсорлардың қоршаған орта жағдайларына бейімделуі өте маңызды. Мысалы, көп қабатты үйлер, көпірлер немесе мұнай құбырлары сияқты құрылыстар түрлі температуралық ауытқуларға, ылғалдылықтың өзгеруіне, химиялық заттардың әсеріне және механикалық күштерге тап болады. Осы себепті, сенсорлар осы сыртқы факторларға төзімді болуы керек. Мұндай жағдайларда оптикалық сенсорлар айтарлықтай тиімді, себебі олар электромагниттік толқындарға сезімтал емес және әртүрлі сыртқы әсерлерге жоғары төзімділік танытады. Бұл олардың жұмыс істеу тиімділігін арттырады, себебі олар климаттық жағдайларға немесе механикалық зақымдарға қарамастан дәл және тұрақты өлшеулерді қамтамасыз ете алады. Сонымен қатар, оптикалық сенсорлар құрылымдарды ұзақ уақыт бойы бақылауға мүмкіндік береді, бұл олардың сенімділігін және қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Осылайша, қоршаған ортаға төзімділік сенсорлардың ұзақ мерзімді жұмысын және құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ететін маңызды фактор болып табылады.

Сенсорлардың қызмет ету мерзімі мен қызмет көрсету қажеттілігі құрылымдардың мониторинг жүйесінің тиімділігін анықтайтын маңызды факторлар болып табылады. Құрылымдар ұзақ мерзім бойы жұмыс істегендіктен, сенсорлар да ұзақ уақыт бойы қызмет көрсетуге қабілетті болуы тиіс. Механикалық және электрлік сенсорлар уақыт өте келе әртүрлі факторлардың әсерінен бұзылып, қайта калибрлеуді немесе ауыстыруды талап етеді. Бұл олардың қызмет көрсету шығындарын арттырады және жүйенің тиімділігін төмендетуі мүмкін. Ал оптикалық сенсорлар өздерінің ерекше ұзақ қызмет ету мерзімімен ерекшеленеді. Олар техникалық қызмет көрсетуді аз талап етеді және қалыпты жұмыс істегенде ұзақ уақыт бойы тұрақты нәтижелерді көрсетеді. Бұл қасиет оптикалық сенсорларды құрылымдық мониторинг үшін өте тиімді етеді, себебі олар бір рет орнатылғаннан кейін

ұзақ уақыт бойы сенімді түрде жұмыс істей алады. Сондай-ақ, олардың техникалық қызмет көрсету талаптары минималды болғандықтан, олар жүйе жұмысын тұрақты және үнемді түрде қамтамасыз етеді. Осылайша, сенсорлардың ұзақ мерзімділігі мен қызмет көрсету қажеттілігі құрылымдардың тиімді мониторингін қамтамасыз ету үшін шешуші рөл атқарады.

Сенсорларды орнату кезінде олардың дәлдігі мен дұрыстығын қамтамасыз ету үшін калибрлеу процесі қажет. Әрбір сенсордың түрі мен қолдану жағдайына байланысты калибрлеу әдістері әртүрлі болады. Көптеген сенсорлар жұмысқа кіріспес бұрын арнайы калибрлеуді талап етеді, себебі бұл оларды жүйеге интеграциялау кезінде қажетті дәлдікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Мысалы, механикалық немесе электрлік сенсорлар көбінесе белгілі бір стандарттарға сай келу үшін уақыт өте келе калибрлеуді қажет етеді. Бұл процестер сенсордың сезімталдығын тексеріп, оның жұмыс параметрлерін дәл реттеуге мүмкіндік береді. Ал оптикалық сенсорлар, әсіресе Брэгг торлары негізіндегі сенсорлар, көбінесе минималды калибрлеуді қажет етеді немесе бұл процеске мүлде мұқтаж болмайды. Бұл олардың құрылымдық мониторинг жүйесіне тез әрі жеңіл интеграциялануын қамтамасыз етеді, өйткені олар сыртқы әсерлерге төзімді және тұрақты жұмыс істей алады. Сондықтан оптикалық сенсорлар олардың қолдану саласындағы қолайлылығы мен үнемділігі арқасында танымал таңдау болып табылады. Осылайша, сенсорларды дұрыс калибрлеу және жүйеге интеграциялау құрылымдардың күйін тиімді бақылауға мүмкіндік береді.

Құрылымдарды бақылау кезінде сенсорлардың сыртқы шудан, вибрациядан және басқа да кедергілерден қорғауы маңызды болып табылады. Себебі, бұл факторлар сенсорлардың жұмысын бұзып, өлшемдердің дәлдігіне теріс әсер етуі мүмкін. Осыған байланысты, сенсорлардың шу мен вибрацияларға қарсы төзімділігі аса маңызды талап болып табылады. Оптикалық сенсорлар, әсіресе Брэгг торлары негізіндегі датчиктер, осы тұрғыда тиімді болып келеді. Олар сыртқы шудан немесе электромагниттік өрістердің әсерінен қорғалмаған және тұрақты жұмыс істей алады. Бұл қасиеттер оларды құрылымдардың мониторингі үшін өте қолайлы етеді, себебі олар қоршаған ортадағы әсерлерге төзімді және жүйенің дәлдігін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, сенсорлардың жауап беру жылдамдығы да үлкен мәнге ие. Құрылымдардағы өзгерістерді уақытында анықтау қауіпсіздік тұрғысынан өте маңызды, себебі бұл құрылымның жағдайын бақылауға мүмкіндік береді. Жауап беру жылдамдығы жоғары сенсорлар жылдам өзгерістерді анықтап, құрылымдағы ақауларды немесе қауіптерді ертерек болжауға көмектеседі. Осылайша, сенсорлардың сыртқы әсерлерден қорғалуы мен жоғары жауап беру қабілеті құрылымдардың қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін қажет.

Жалпы, құрылымдық мониторинг жүйелерінде сенсорларды пайдалану құрылымдардың күйін бақылаудың тиімділігі мен маңыздылығын айқындайды. Бүгінде құрылымдарды бақылауға арналған сенсорлар түрлі

типтерге бөлінеді, олардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар. Механикалық, электрлік, термиялық және оптикалық сенсорлар құрылымдардағы түрлі параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді. Оптикалық сенсорлар, соның ішінде Брэгг торлары негізіндегі датчиктер, құрылымдық мониторинг саласында жоғары дәлдік, ұзақ қызмет мерзімі және төзімділік секілді ерекшеліктерімен өзге типтерден ерекшеленеді. Бұл сенсорлардың сыртқы әсерлерге төзімділігі мен ұзақ мерзімде тұрақты жұмыс істей алу қабілеті оларды қазіргі құрылыс саласында қолданудың маңызды құралы етеді. Алайда, сенсорлардың тиімділігін арттыру үшін олардың жұмыс принциптерін жетілдіру, сондай-ақ әртүрлі қоршаған орта шарттарына бейімделген жаңа технологиялар мен жүйелерді енгізу қажет. Бұл инновациялар құрылымдардың сенімділігін арттырып, олардың күйін бақылау процестерін жақсартып алады, соның нәтижесінде құрылымдардың қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігі қамтамасыз етіледі.

айдау қарқындылығы және жарық өткізгіштің ұзындығы әсерінен айтарлықтай спектрлік ауытқулар орын алуы мүмкін. Бұл жағдайларда талшықты Брэгг торлары спектрдің өзгеруін түзету, спектрді тегістеу немесе сигналды күшейткеннен кейінгі спектрлік бұрмалауларды жою үшін пайдаланылуы мүмкін. Брэгг торларының бұл қасиеттері оларды эрбий күшейткіштерінің спектрлік ауытқуларын бақылау және басқаруда тиімді құрал етеді. Мұндай әдіс арқылы күшейткіштің жұмыс өнімділігін жақсартуға, спектрлік бұрмалауларды азайтуға және біркелкі күшейтуді қамтамасыз етуге болады.

Талшықты Брэгг торының резонанстық толқын ұзындығы жарық өткізгіштің өзегінің тиімді сыну көрсеткіші мен осы көрсеткіштің модуляция кезеңімен анықталады. Бұл екі параметр, өз кезегінде, сыртқы деформациялық кернеулер мен температураның әсерінен өзгеріп отырады. Сондықтан, деформация мен температураның әсерінен туындайтын шағылыстың орталық толқын ұзындығының ауытқуын математикалық өрнек арқылы сипаттауға болады. Бетон конструкцияларының беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін деформация тудыратын факторларды бақылау мен ескеру маңызды, өйткені олар құрылымның жұмыс жағдайларын бұзуы мүмкін. Осыған байланысты, талшықты-оптикалық сенсорларды пайдалану сияқты заманауи бақылау әдістері құрылымдық өзгерістерді дер кезінде анықтап, талдауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс зақымдану мен бұзылулардың алдын алу шараларын тиімді қолдануға көмектеседі, сондай-ақ деформацияларды бақылаудың және бағалаудың сапасын арттырады. Талшықты-оптикалық жүйелердің арқасында құрылымдардың күйін үздіксіз бақылап, кез келген өзгерістерді анықтау және оларға уақытында жауап беру мүмкіндігі артады, бұл құрылымдардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз етеді [61].

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial \lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (3.1)$$

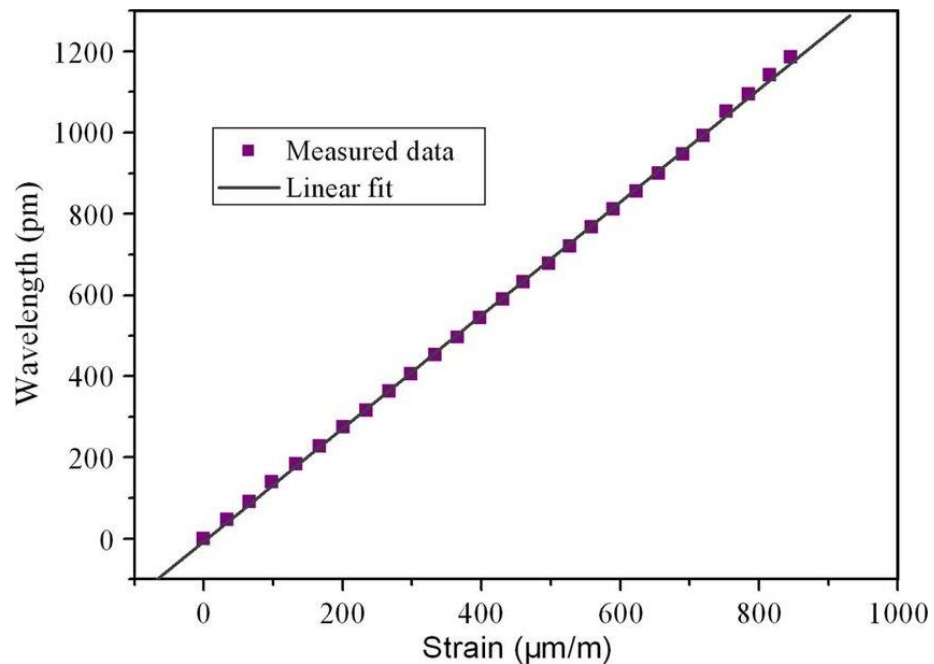
формулань ары қарай қорытындыласак, яғни Пуассон коэффициентін енгіземіз:

$$p_B = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3.2)$$

Бірмодальдық оптикалық кабель үшін бірінші ретті қуатын мәні: $p_{11} = 0,113$, екінші ретті қуатын мәні, $p_{12} = 0,252$ ал Пуассон коэффициентін мәні, $\nu = 0,16$, ал толқын ұзындығының сыну көрсеткішінің мәні, $n = 1,452$ бұл мәндер 1550 нм толқын ұзындығында ғана жүзеге асады.

Есептік нәтижелер бұл оптикалық кабельдің сезімталдық арттыру мақсатында қолданылады яғни бұл дегеніміз бетонға негізделген оптикалық кабель арқылы деформацияны және кернеулерді нақты уақыт режимінде анықтауға септігін тигізеді.

$$p_B = \frac{1,452^2}{2} [0,252 - 0,16(0,113 + 0,252)] = 0,204 \quad (3.3)$$



3.2 - сурет – Алынған нәтижелер бойынша Matlab бағдарламасындағы Толқын ұзындығының деформация мен кернеулікке қатынасы

3.1 Брэгг торларының визуализациялау мүмкіндіктері және өлшеу дәлдігі мен сенімділігін бағалау

Брэгг торлары (FBG), оптикалық талшықтарда қолданылатын, бетон конструкцияларындағы деформациялар мен басқа параметрлерді бақылауға арналған жоғары дәлдікті және сенімді деректерді ұсынатын технология болып табылады. Бұл сенсорлар құрылымдардың күйін нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік береді, сондай-ақ алынған деректерді дұрыс интерпретациялау мен бағалау маңызды рөл атқарады. Брэгг торларынан (FBG) алынған мәліметтер бетондағы деформациялар мен температураның өзгерістеріне байланысты толқын ұзындығының өзгерістерін қамтиды. Бұл өзгерістер құрылымның күйін бақылап, кез келген ақауларды ертерек анықтауға мүмкіндік береді. Деректерді жинау процесі үшін FBG сенсорларына қосылған спектрометрлер немесе оптикалық анализаторлар пайдаланылады, олар деректерді жоғары дәлдікпен өлшейді. Алынған мәліметтер нақты уақыт режимінде орталықтандырылған серверге немесе жұмыс станциясына жіберіледі, бұл оларды талдауға және визуализациялауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс құрылымдардың күйін басқаруда негізделген шешімдер қабылдауға көмектеседі және бетон конструкцияларының беріктігі мен қауіпсіздігін тиімді түрде бақылауға мүмкіндік береді.

Мониторингтің жылдамдығын қамтамасыз ету үшін жоғары жылдамдықты және төмен кідірісті деректерді беру хаттамалары пайдаланылады [62]. Бұл хаттамалар құрылымдардағы деформациялар мен температура өзгерістерін тиімді түрде бақылауға мүмкіндік береді. Simulink және MATLAB бағдарламалық жасақтамасында өзгерістерді модельдеу және визуализациялау арқылы деформациялар мен температураның графикалық көрінісін қамтамасыз ету мүмкіндігі бар. Бұл әдіс құрылымның барлық бөліктеріндегі деформациялар мен кернеулердің таралуын көрсетеді. FBG сенсорларын орнатпас бұрын, механикалық деформациялар мен температураның өзгеруімен байланысты негізгі сызықтар мен толқын ұзындығының өзгеру коэффициенттерін бастапқы нәтижелермен салыстыру қажет. Сонымен қатар, FBG сенсорларының өлшеу нәтижелерін дәстүрлі деформация сенсорларымен немесе басқа жоғары дәлдіктегі құралдармен салыстыру керек. Өлшеу дәлдігін тексеру үшін белгілі сипаттамалары бар бақылау үлгілерін қолдану талап етіледі. Нәтижелердің сенімділігі мен дәлдігін арттыру үшін, өлшенген деректер негізінде деформациялардың таралуын есептеу үшін сандық әдістер пайдаланылады. Бұл әдіс деректерді түсіндірудің дәлдігін және сенімділігін арттырып, мониторинг процесін жақсартады [77].

Деректерді модельдеу және талдау үшін ақырлы элементтер (FEA) және шекаралық элементтер (BEA) әдістерін қолдану маңызды. Бұл әдістер құрылымның сипаттамасын нақты және тиімді болжауға мүмкіндік береді, әсіресе FBG сенсорларының күйін бақылау кезінде. Сенсорлардың жұмысын диагностикалық жүйелер арқылы үнемі бақылап, алынған нәтижелерді салыстыру қажет. Бұл тәсіл құрылымның әртүрлі бөліктеріндегі сенсорлардан алынған деректерді тексеруге мүмкіндік береді және ауытқуларды анықтауға көмектеседі. Сонымен қатар, өлшемдердің дұрыстығын растау үшін деректерді қадағалап отыру маңызды. FBG сенсорларының тұрақтылығы мен сенімділігін бағалау үшін ұзақ мерзімді сынақтар жүргізу қажет. Мұндай сынақтар әртүрлі жұмыс жағдайларын қамтып, сенсорлардың беріктігін, сенімділігін және дәлдігін анықтайды. Олардың нәтижелері құрылымдардың дұрыс жұмыс істеп тұрғанын қамтамасыз ету үшін маңызды, себебі тұрақты мониторинг пен нақты деректерді алу құрылымның күйін дұрыс бағалауға және болашақтағы ақауларды алдын ала болжауға мүмкіндік береді [63].

3.2 Мониторинг нәтижелерінің құрылымдар жұмысындағы маңызы мен қауіпсіздік аспектілері

Брэгг торлары әртүрлі салаларда, оның ішінде бетон конструкцияларындағы құрылымдардың қауіпсіздігі мен жұмысын бақылау жүйелерінде кеңінен қолданылады. Брэгг торларының микротолқынды құрылымдары, әсіресе құрылымдардың деңгейін өлшеу сияқты бақылау міндеттерінде маңызды рөл атқарады. Бұл торлар периодты гетерогенділікті

қамтамасыз ететін микротолқынды құрылғылардың мысалы болып табылады. Талшықты Брэгг торлары талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінде және физикалық параметрлерді өлшеу үшін қолданылатын сенсорларда жиі пайдаланылады. Брэгг торлары фоторефрактивті оптикалық талшықтарда қалыптасады және оларды әртүрлі әдістер арқылы жазуға болады. Мысалы, фазалық әдіс, интерферометриялық әдіс және кадамдық әдіс сияқты түрлі тәсілдер қолданылып, бұл торлардың құрылымы жазылады. Брэгг торларының артықшылығы олардың жоғары сезімталдығы мен дәлдігі болып табылады, бұл оларды құрылымдық мониторинг жүйелерінде сенімді сенсорлар ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Бұл технология әртүрлі құрылымдардың күйін бақылап, олардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады [73].

Брэгг торлары бетон конструкцияларындағы құрылымдардың қауіпсіздігі мен жұмысын бақылау үшін, негізінен эксперименттік жағдайда пайдаланылады. Бұл сенсорлар температура, қысым, ылғалдылық және деформация сияқты әртүрлі параметрлерді дәл әрі сенімді өлшеуге мүмкіндік береді, осылайша олар құрылымдардың қауіпсіздік деңгейін бақылаудың құнды құралы болып табылады. FBG сенсорларының жоғары сезімталдығы арқасында, олар құрылымның күйіндегі ең кішкентай өзгерістерді де анықтай алады. Бұл сенсорлар деформация мен температураның өзгерістеріне өте сезімтал, сондықтан оларды мониторинг нәтижелерін алу үшін қолданғанда, жоғары дәлдікке қол жеткізу мүмкін болады [64].

FBG сенсорлары жарықтардың пайда болуы мен дамуын ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді, бұл үлкен құрылымдық зақымданудың алдын алу үшін маңызды. Жарықтардың дамуын болжау үшін деректерді модельдеу және талдау жүргізіліп, алдын алу шаралары қабылданады, бұл құрылымдардың сенімділігін арттырады. Қазіргі уақытта көпір құрылымдарын бақылауда FBG сенсорлары көлік қозғалысы сияқты динамикалық жүктемелердің әсерін зерттеу үшін негізгі аймақтарға орнатылған. Бұл құрылымдардағы шамадан тыс жүктемелерді дер кезінде анықтап, нығайту бойынша қажетті шараларды қабылдауға мүмкіндік береді [71, 72].

Ғимараттар мен биік құрылыстарды деформацияларды бақылауда FBG сенсорлары жел мен сейсмикалық жүктемелерден туындайтын деформациялар мен тербелістерді анықтауға көмектеседі, бұл тұрғындардың қауіпсіздігі үшін маңызды болып табылады. Бұл сенсорлар ғимараттар мен құрылыстардағы кез келген өзгерістерді дәл өлшей отырып, қауіпті жағдайларды алдын ала болжауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, гидротехникалық құрылымдарды бақылау үшін FBG сенсорлары су деңгейінің өзгерістерінен және басқа да факторлардан туындаған қысым мен деформацияларды бақылауға мүмкіндік береді. Бұл бөгеттер мен бөгендердің жұмысын тиімді басқаруға ықпал етеді.

Брэгг торларын бетон конструкцияларында пайдалану құрылымдардың қауіпсіздігі мен жұмысын бақылаудың маңызды құралы болып табылады. Мұндай сенсорлар құрылымдардың жай-күйі туралы нақты және егжей-

тегжейлі ақпарат береді, бұл құрылымдағы кез келген ақаулар мен зақымдарды ерте анықтауға көмектеседі. Ерте кезеңде анықталған мәселелер төтенше жағдайлардың алдын алуға және құрылымдардың қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді. Заманауи талдау және визуализация әдістері мониторинг нәтижелерін тиімді түсінуге және құрылымдарды басқару мен техникалық қызмет көрсету бойынша дұрыс шешімдер қабылдауға септігін тигізеді [64, 65].

3.3 Зерттеу жүргізу барысында деформацияларды өлшеудің нәтижелері

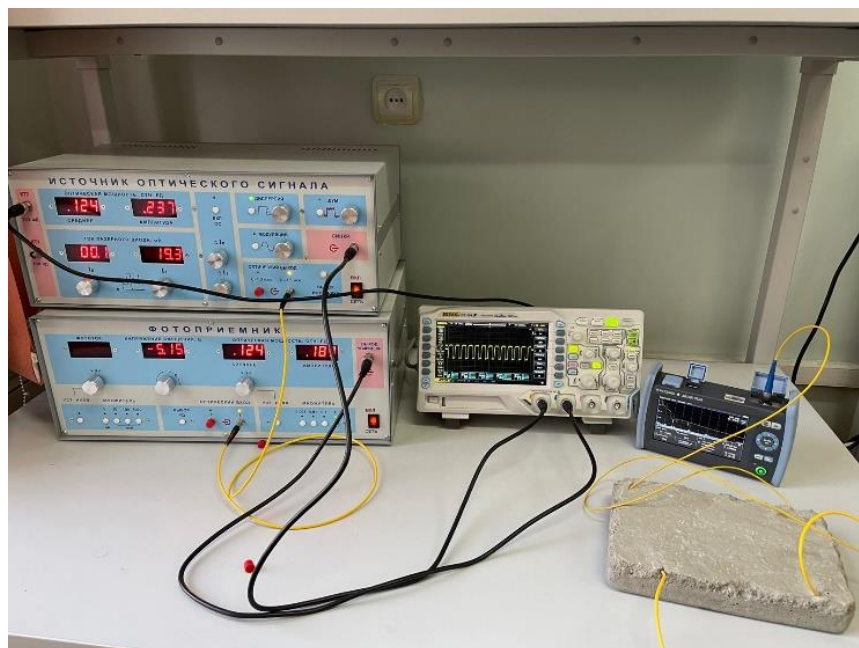
Зертханалық жұмыс барысында техника қауіпсіздігі ережелерін сақтау аса маңызды. Оптикалық кабельдер арқылы бетон конструкцияларының деформациясын зерттеу түрлі жүктемелер кезінде бетонның сипаттамасын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді [70]. Бұл зерттеулер нақты жұмыс жағдайларын модельдеуге және құрылымдардың беріктігін болжауға септігін тигізеді. Зерттеу үшін стандартты өлшемдегі бетон үлгілері жасалады, және нақты жағдайдағы бірмодалы кабельдер қолданылып, математикалық есептеулер жүргізіледі.

Оптикалық талшықтар механикалық зақымданудан қорғалып, сенімді өлшеу аппаратурасымен байланысады. Үлгілер статикалық, динамикалық жүктемелер мен температураның өзгеруіне ұшырайды. Өлшеу бетонның әрекеті туралы нақты деректер алу үшін бақыланатын жағдайларда жүзеге асырылады. Статикалық жүктемелер кезінде деформациялар сызықтық тәуелділікті көрсетеді, яғни бетон аққыштық шегіне жеткенше сызықтық түрде өзгеріп отырады. Осыдан кейін сызықтық емес деформациялар байқалып, бұл құрылымның бұзылу процесінің басталғанын білдіреді. Температураның өзгеруі сенсорлар арқылы бетонның кеңеюіне немесе қысылуына әкеледі, нәтижесінде құрылымның тұтастығына айтарлықтай әсер етуі мүмкін екендігі анықталды [74].

Оптикалық кабель бетон үлгілеріндегі микро жарықтардың пайда болуы мен дамуын дәл анықтай алады, бұл ықтимал зақымдануды алдын ала болжауға мүмкіндік береді. Зертханалық зерттеулер көрсеткендей, ұзақ уақыт бойы жұмыс істейтін бетон үлгілері сусымалы құбылыстарды байқатады. Брэгг торлары уақыт өте келе орын алатын баяу деформацияларды тіркеп, құрылымның беріктігін бағалау үшін маңызды ақпарат береді [66].



3.3 - сурет – Бетон конструкциясымен жұмыс істеу барысы



3.4 - сурет – Рефлектометрде деформация мәнін анықтау

Деформациялар мен температураның өлшеу барысында оптикалық кабельдің 1550 нм толқын ұзындығында жұмыс жасайтынын ескеріп нақты нәтижеледі алуға тырысамыз.



3.5 - сурет – Бетон конструкциясының күшейткіш арқылы температуралық және кернеуін өлшеу барысы

3.4 Зерттеу бағыттарына ұсыныстар және компьютерлік модельдер

Диссертациялық зерттеу барысында құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу жүзеге асырылды. Бұл зерттеу құрылыс саласындағы инновациялық технологиялардың маңыздылығын көрсетіп, деформация процестерін дәл және тиімді бақылауға мүмкіндік беретін датчиктердің жаңа буынын дамытуға бағытталған.

Зерттеу нәтижесінде келесідей негізгі қорытындылар жасалды:

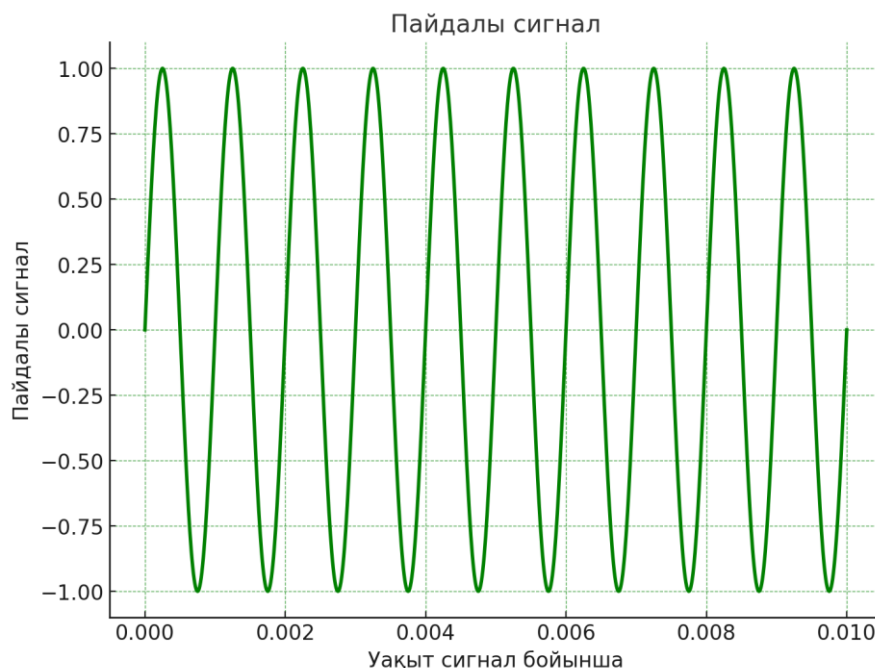
1. Теориялық негіздеме. Талшықты-оптикалық технологиялардың құрылыс конструкцияларының деформациясын өлшеудегі мүмкіндіктері мен артықшылықтары анықталды. Бұл технологиялардың жоғары дәлдігі, ұзақ мерзімді тұрақтылығы және сыртқы орта факторларына төзімділігі негізделді.

2. Модельдеу және эксперимент. Интеллектуалды талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу қағидалары мен құрылымдық ерекшеліктері компьютерлік модельдеу арқылы зерттелді. Жүргізілген эксперименттер нәтижесінде датчиктердің құрылыс материалдарының әртүрлі түрлеріндегі деформацияларды тиімді өлшей алатындығы дәлелденді.

3. Практикалық қолданыс. Датчиктердің қолдану аймақтары анықталып, олардың құрылыс конструкцияларының беріктігін бақылау және ықтимал апаттық жағдайлардың алдын алу үшін қажеттілігі расталды. Бұл датчиктерді қолданып, ғимараттардың қызмет ету мерзімін ұзарту мен қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл код Python тілінде жазылған және Matplotlib кітапханасын қолданып, сигналдың уақытқа тәуелді графигін сызуға арналған.

```
# Plot the signal with a green line
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(time, signal, 'g', linewidth=2) # Green color for the signal
plt.grid(color='green', linestyle='--', linewidth=0.5)
plt.title("Пайдалы сигнал", fontsize=14)
plt.xlabel("Уақыт сигнал бойынша", fontsize=12)
plt.ylabel("Пайдалы сигнал", fontsize=12)
plt.show()
```



3.6 - сурет – Идеалды пайдалы сигнал

Бұл график синусоидалық пайдалы сигналдың уақыт бойынша өзгеруін көрсетеді. Графиктің сипаттамасы:

- Сигнал синусоидалық функция (harmonic signal) негізінде тұрғызылған, бұл тұрақты жиілік пен амплитудасы бар периодтық тербелісті білдіреді.

- Сигналдың жиілігі 1000 Гц, бұл бір секундта сигналдың 1000 рет толық цикл жасайтынын білдіреді.

– Уақыт осі 0 секунд-тан 0.01секунд-қа дейінгі аралықта алынған, яғни бұл график сигналдың бірнеше периодын ғана көрсетеді.

– Сигналдың ең жоғары мәні $+1+1+1$, ал ең төменгі мәні $-1-1-1$. Бұл сигналдың амплитудасы тұрақты екенін көрсетеді.

– Мұндай сигналдар көптеген инженерлік және ғылыми салаларда қолданылады:

а) Телекоммуникация. Сигналдарды беру және өңдеу.

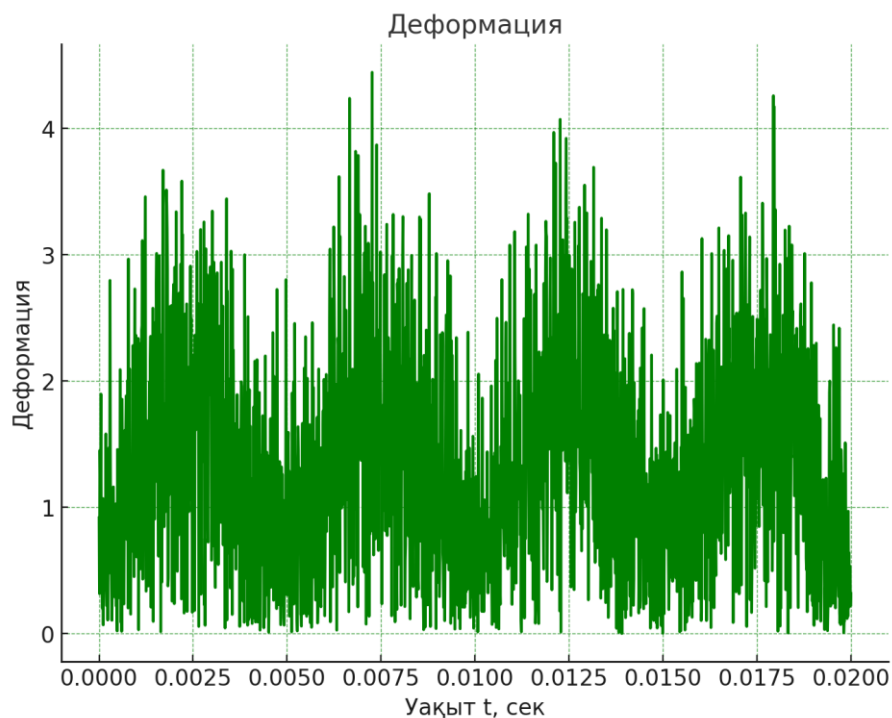
ә) Электроника. Тесттік сигнал ретінде қолдану.

б) Физика. Тербелістер мен толқындарды модельдеу.

в) Басқару жүйелері. Периодтық тербеліс талдауы

Мұндай сұлба сигналдың уақыт бойынша қалай өзгеретінін визуалды түрде көрсетеді. Сонымен қатар, мұны жиілік, фаза немесе амплитуда сияқты параметрлерді талдау үшін қолдануға болады.

Материалдың әрекетін талдау үшін кернеу мен деформация диаграммаларын құру.



3.7 - сурет – Деформация кезіндегі сигналдың өзгерісі

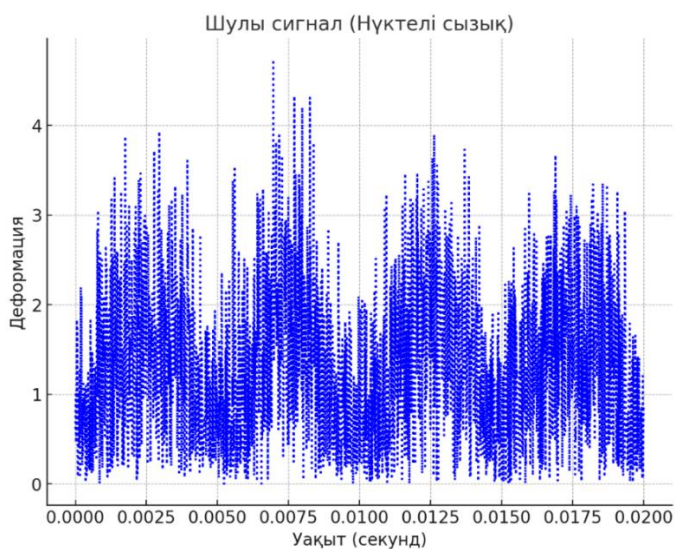
Бұл график деформацияның уақыт бойынша өзгеруін көрсетеді.

Келесі график нақты құрылымның немесе материалдың деформациясын визуализациялауға көмектеседі. Мұндай деректер негізінде:

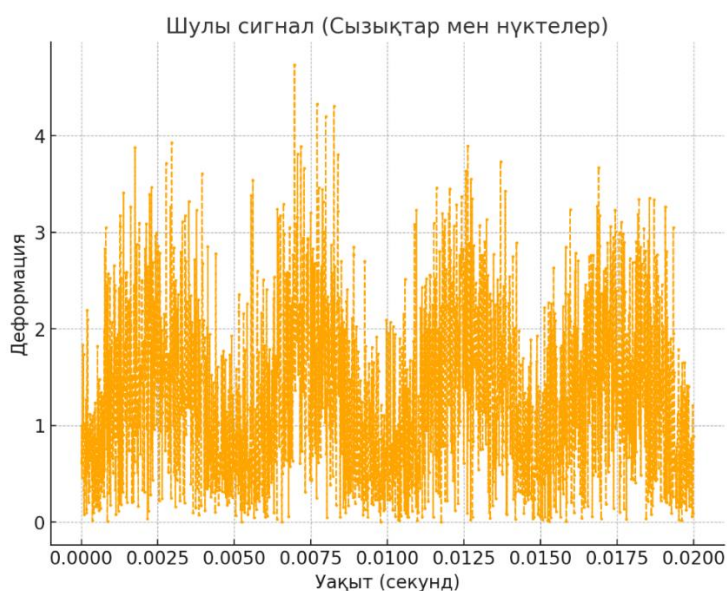
- Құрылымның қауіпсіздік деңгейі бағаланады.
- Материалдың ұзақ мерзімді төзімділігі есептеледі.
- Механикалық процестерді оңтайландыру бойынша шешімдер қабылданады.

Кесте 3.1 - Деформация деректерін талдау нәтижелері

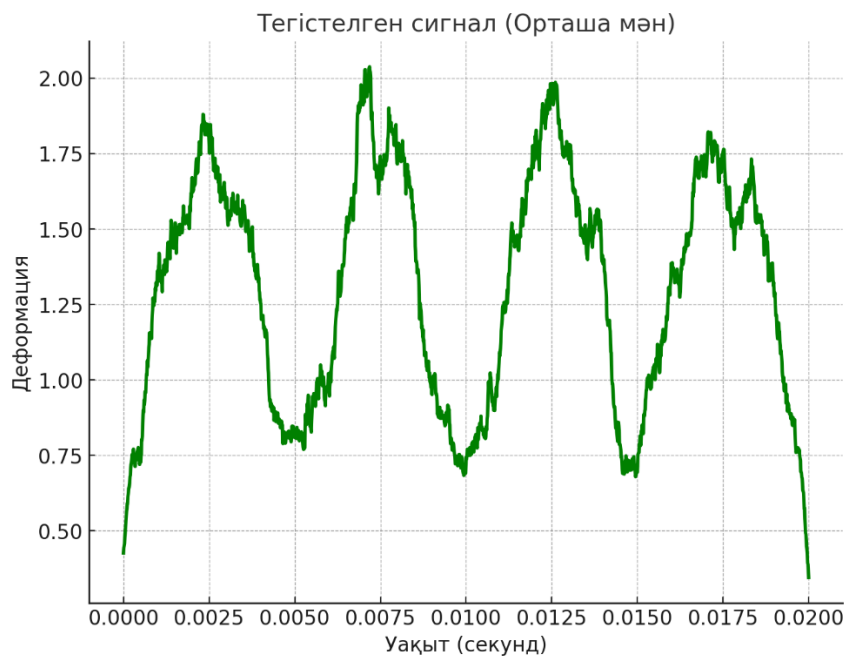
Орташа мән	Медиана	Орташа квадраттық ауытқу	Ең үлкен мән	Ең кіші мән	Диапазон
1.311069	1.219873	0.856105	4.731309	0.001321	4.729988



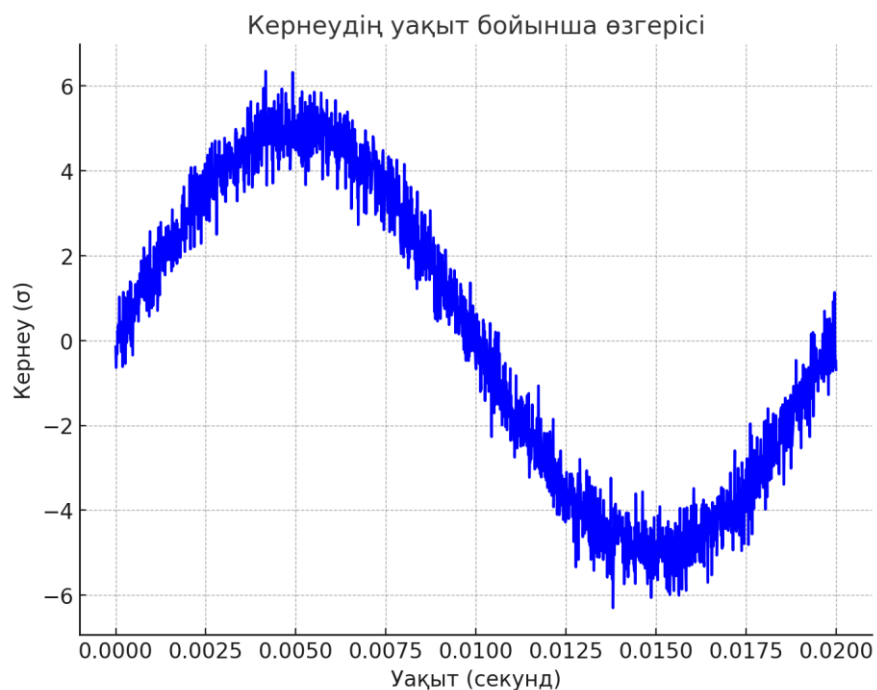
3.8 - сурет – Нүктелі сызықтармен көрсетілген деформацияның уақытқа тәуелділік сұлбасы



3.9 - сурет – Сызықтар және нүктелермен көрсетілген деформацияның уақытқа тәуелділік сұлбасы



3.10 - сурет – Тегістелген сигнал бойынша көрсетілген деформацияның толқын ұзындығына тәуелділік сұлбасы



3.11 - сурет – Кернеуліктің уақыт бойынша өзгерісі

Деформацияның математикалық моделінің негізгі элементтері:

1. Негізгі теңдеулер. Егер деформация серпімді аймақта болса, онда Юнг модулі қолданылады:

$$E = \frac{6ks\lambda_B}{mh^2 \frac{\Delta\lambda_B}{E}} * \frac{b}{a+b} \quad (3.4)$$

мұндағы, ks — деформацияның сезімталдық коэффициент; $\Delta\lambda_B$ — деформацияда шағылысқан толқын ұзындығының өзгерісі; λ_B — толқын ұзындығы (Брэгг торына қатысты).

2. Толық деформация моделі. Жалпы жағдайда деформация уақытқа, температураға және басқа сыртқы факторларға тәуелді болады. Толық модель келесі түрде жазылады:

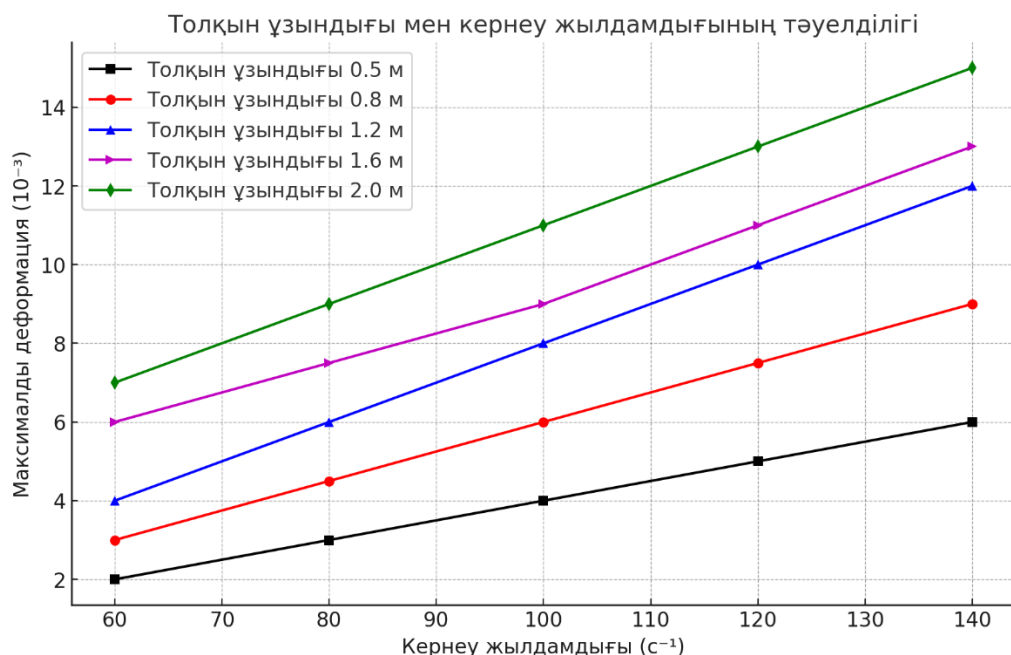
$$\Delta\lambda_B = \frac{3ks\lambda_B}{mh^2 E} F = K \cdot F \quad (3.5)$$

Тәжірибелі түрде, Брэгг торы шағылысу спектрін өлшеу арқылы орталық толқын ұзындығының ығысуы мен қолданылатын қысым арасындағы байланыс Лоренц күшіне сәйкес келеді. Оның көлбеуінен k бетон модулін алуға болады [58].

$$E = \frac{3ks\lambda_B}{mh^2 K} \quad (3.6)$$

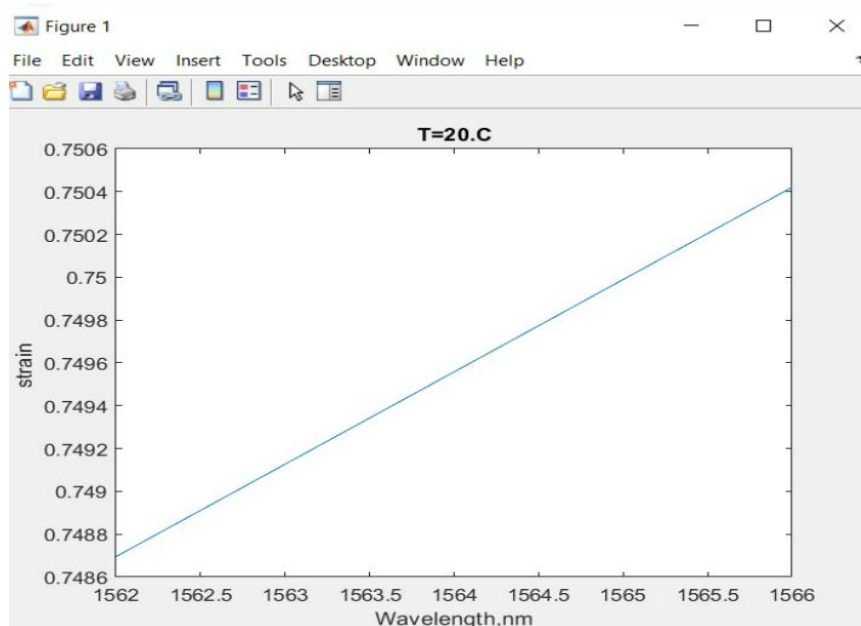
3.4.1 Модельдің параметрлерін анықтау

Модель параметрлері зерттеліп отырған материалдың қасиеттеріне байланысты эксперименттік деректер негізінде анықталады.

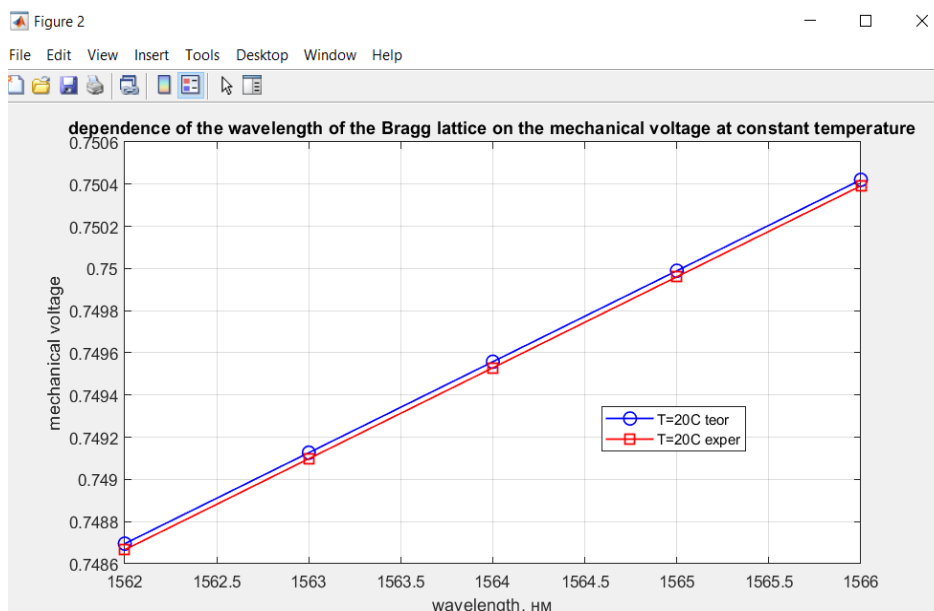


3.12 - сурет - Толқын ұзындығы мен кернеу жылдамдығының тәуелділігі

Бұл график инженерия мен материалтану саласында, әсіресе, материалдардың механикалық қасиеттерін зерттеу үшін пайдалы. Ол материалдың әртүрлі толқын ұзындықтары кезінде кернеу жылдамдығына қалай жауап беретінін көрсетеді.



3.13 - сурет – Температура тұрақты кездегі Брэгг торының толқын ұзындығының деформацияға тәуелділік графигі



3.14 - сурет - Температура тұрақты болған жағдайда Брэгг торының толқын ұзындығының деформацияға тәуелділігін көрсететін теориялық және эксперименттік графикалар

Эксперименттік деректерді түсіндіру және конструкциялардың беріктігін болжау үшін MATLAB және Python бағдарламаларынды негізінде модельдеу бағдарламалық құралы қолданылды. Деректерді талдау берік және тұрақты бетон конструкцияларын жасауға көмектесетін модельдер әзірлеуге мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл магистрлік диссертацияда Брэгг торларының математикалық моделін жасап, бетон конструкцияларындағы деформацияларды зертханалық өлшеулермен зерттеу жүргізілді. Әр түрлі жүктеме жағдайларында бетонның әрекетіне қатысты маңызды деректер алынды. Бұл зерттеулер бетон конструкцияларын жобалау және салу әдістерін жетілдіруге, сондай-ақ олардың беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз етуге көмектеседі. Зертханалық сынақтар Брэгг торлы оптикалық кабельдер мен олардағы сенсорлардың тиімділігі мен дәлдігін көрсетті, бұл өз кезегінде олардың құрылыс және инженерия саласындағы маңыздылығын арттырады. Олардың көмегімен бетон конструкцияларының күйі дәл және сенімді түрде бақылануы мүмкін. Осындай сенсорлық жүйелер құрылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады, себебі олар бетонның деформациясын, температура өзгерістерін және басқа да физикалық параметрлерді нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс құрылыс саласында жаңа мүмкіндіктер ашып, құрылымдардың жұмыс істеу ұзақтығын арттырады.

Зертханалық өлшеулер оптикалық кабельдерден алынған деректердің дәлдігі мен сенімділігін көрсетті, бұл құрылымдық ақаулардың ерте кезеңде анықталуына және олардың алдын алуға көмектеседі. Статикалық және циклдік жүктемелер бойынша жүргізілген эксперименттерде бетонның деформациясын дәл тіркеу мүмкіндігі байқалды, сонымен қатар бірнеше жүктеме жағдайларында микро деформациялардың жинақталуы анықталды. Бұл нәтиже инженерлерге бетонның беріктік қасиеттерін бағалауға және оның нақты эксплуатациялық жағдайлардағы сипаттамасын болжауға мүмкіндік береді. Мұндай микро деформациялар құрылымдардың жалпы беріктігіне айтарлықтай әсер етеді, сондықтан оларды жобалау және пайдалану кезінде ескеруге тура келеді. Бұл зерттеулер құрылымдардың сенімділігін арттыруға және оларды тиімді басқару әдістерін жасауға үлес қосады, себебі оларда кездесетін кішкентай ақаулар мен өзгерістер ерте кезеңде анықталып, қажетті түзетулер енгізілуі мүмкін. Осындай сенсорлар мен технологияларды қолдану құрылымдардың қауіпсіздігі мен жұмысын қамтамасыз етудің маңызды құралы болып табылады [71].

Температурлық сынақтар оптикалық кабельдер мен Брэгг торларының бетон конструкцияларындағы температуралық деформацияны тиімді өлшей алатынын көрсетті. Бұл зерттеу қоршаған ортаның температурасы мен ішкі жылу көздерінің өзгеруіне байланысты бетон құрылымдарындағы температуралық кернеулерді бақылауға мүмкіндік береді. Осы деректерді талдау құрылымдардың жылу кернеулерінің әсерін және олардың жалпы тұрақтылығы мен қауіпсіздігіне қалай ықпал ететінін бағалауға көмектеседі.

Қорытындылай келе, оптикалық кабельдердегі Брэгг торларының көмегімен бетон конструкцияларындағы деформацияларды зертханалық түрде өлшеу олардың тиімділігін және құрылыс объектілерінің күйін бақылаудағы дәлдігін растайды. Бұл зерттеу нәтижелері бетон құрылымдарын жобалау мен

салудың жаңа әдістерін жасауға қажетті маңызды ақпарат береді, себебі олар құрылымдардың беріктігін, сенімділігін және ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету үшін аса маңызды. Сондай-ақ, бұл әдістер құрылымдық мониторинг пен бақылау жүйелерін жетілдіруге, ықтимал ақауларды ерте анықтауға және жөндеу шараларын уақытылы қабылдауға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Barre, F.; Bisch, P.; Chauvel, D.; Cortade, J.; Coste, J.; Dubois, J.; Erlicher, S.; Gallitre, E.; Labbé, P.; Mazars, J.; et al. Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2016; стр. 1–226.
- 2 Chrysanidis, T.A.; Panoskaltsis, V.P. Experimental research on cracking behavior of iron concrete stretch ass. Case Stud. Constr. Mater. 2022.
- 3 Xu, X.; Zhao, Y. Propagation of cracks caused by corrosion in reinforced concrete beams subject to different corrosion methods and load levels. Constr. Build. Mater. 2021.
- 4 Pan Z., Liu H., Wang L., Dian F., Zhou C., Xu B., Li Y. A novel method for improving salinity resolution of optical fiber sensor based on modified adaptive variational mode decomposition (2024) Optics and Laser Technology.
- 5 Hu, Z.; Liu, Q. Numerical study of multi-type transport in concrete with cracks under external load. Cailiao Daobao/Mater. Rep. 2023, 37.
- 6 Cheng, P.; Zhang, L.; Lin, G.; Qian, K.; Qian, X.; Ruan, S. Analyze the initial cracking of the interface between a composite wall of a linked channel and concrete and a fill wall. Appl. Sci. 2022, 12.
- 7 Furtado, A. Assessment and Retrofitting of Building Structures: Experimental Testing and Modelling - Editorial. Appl. Sci. 2023, 13.
- 8 Song S., Tong X., Shen Y., Guo Y. Real-time optical fiber sensing system for multi-point temperature measurement based on beat frequency signals (2024).
- 9 Concu, G.; Trulli, N. Concrete Defects Sizing by Means of Ultrasonic Velocity Maps. Buildings 2018.
- 10 Карташев, В.Г.; Качанов, В.К.; Соколов, И.В.; Шалимова, Е.В.; Концов, Р.В.; Воронкова, Л.В. Ультразвуковое структурное зондирование изделий на основе материалов со сложной структурой путем анализа статистических характеристик структурного шума. 2015, 51, 360–373.
- 11 Li Y., Zhou X., Zhang Y., Diao H., Qu H., Peng W., Yu Q. Switchable and tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser based on the parallel filter of the all-fiber Sagnac interferometer embedded with an FBG and the Fabry-Perot filter (2024) Optics and Laser Technology, 176, DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.
- 12 Capozzoli, L.; Rizzo, E. Combined methods of non-destructive testing in civil engineering: laboratory and real tests. Constr. Build. Mater. 2017, 1139–1150.
- 13 Spears, M.; Hedjazi, S.; Taheri, H. Ground penetrating radar applications and implementations in civil construction. J. Struct. Integr. Maint. 2023, 8, 36–49.
- 14 Chybiński, M.; Kurzawa, Z.; Polus, Ł. Problems with Buildings Lacking Basic Design Documentation. Procedia Eng. 2017, 24–31.
- 15 Jain, A.; Kathuria, A.; Kumar, A.; Verma, Y.; Murari, K. Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. Procedia Eng. 2013, 54, 241–251.
- 16 Rubene, S.; Vilnitis, M. Use of the Schmidt rebound hammer for non-destructive concrete structure testing in field. Civ. Eng. 2014, 1-B, 13–19.
- 17 Brencich, A.; Cassini, G.; Pera, D.; Riotto, G. Calibration and Reliability

of the Rebound (Schmidt) Hammer Test. *Civ. Eng. Arch.* 2013, 1, 66–78.

18 Sztubecki, J.; Topoliński, S.; Mrówczyńska, M.; Bařgrićık, B.; Beyciořlu, A. Experimental Research of the Structure Condition Using Geodetic Methods and Crackmeter. *Appl. Sci.* 2022, 12.

19 Błaszczak-Bćak, W.; Suchocki, C.; Janicka, J.; Dumalski, A.; Duchnowski, R.; Sobieraj-Złobińska, A. Automatic Threat Detection for Historic Buildings in Dark Places Based on the Modified OptD Method. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 123.

20 Ali-Benyahia, K.; Kenai, S.; Ghrici, M.; Sbartai, Z.-M.; Elachachi, S.-M. Analysis of the accuracy of in-situ concrete characteristic compressive strength assessment in real structures using destructive and non-destructive testing methods. *Constr. Build. Mater.* 2023.

21 Ptacek, L.; Strauss, A.; Bos, C.; Peyerl, M. Quality control of concrete curing. In *Proceedings of the 18th Fib Symposium, Lisbon, Portugal, 14–16 June 2021*; pp. 720–728.

22 Cristofaro, M.T.; Nudo, R.; Tanganelli, M.; D'Ambrisi, A.; De Stefano, M.; Pucinotti, R. Issues concerning the assessment of concrete compressive strength in existing buildings: Application to a case study. *Struct. Concr.* 2017, 19, 795–805.

23 Wan Y., Pu S., Wang J., Yang Z., Lin X., Zhang C., Lahoubi M., Qian K., Xu Y., Li X. Dual-parameter fiber sensor based on Fabry-Pérot cavity cascaded with Terfenol-D rod integrated fiber Bragg grating (2024) *Optics Communications*, 564, DOI: 10.1016/j.optcom.2024.130647

24 Yang, L.; Li, C.; Luo, C. Thermal Strain Detection for Concrete Structure Cold Shrinkage under Stress Constraint with FBG. *Sensors* 2022, 22, 9660.

25 Pereira, L.; Mesquita, E.; Alberto, N.; Melo, J.; Marques, C.; Antunes, P.; André, P.S.; Varum, H. Fiber Bragg Grating Sensors for Reinforcing Bar Slippage Detection and Bond-Slip Gradient Characterization. *Sensors* 2022, 22, 8866.

26 Banda, P.; Della Tamin, M.; Meyer, J. Applied Quasi-Distributed Fibre Bragg Grating Strain Sensors in Structural Damage Sensing of a Bridge Structure. *SAIEE Afr. Res. J.* 2022, 113, –87.

27 Pereira, M.; Glisic, B. Physics-Informed Data-Driven Prediction of 2D Normal Strain Field in Concrete Structures. *Sensors* 2022, 22, 7190. [CrossRef]

28 Lan, C.; Zhou, W.; Xie, Y. Detection of Ultrasonic Stress Waves in Structures Using 3D Shaped Optic Fiber Based on a Mach–Zehnder Interferometer. *Sensors* 2018, 18, 1218.

29 Png, W.; Lin, H.; Pua, C.; Lim, J.; Lim, S.; Lee, Y.; Rahman, F. Feasibility use of in-line Mach–Zehnder interferometer optical fibre sensor in lightweight foamed concrete structural beam on curvature sensing and crack monitoring. *Struct. Heal. Monit.* 2018, 17, 1277–1288.

30 Bremer, K.; Weigand, F.; Zheng, Y.; Alwis, L.S.; Helbig, R.; Roth, B. Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors. *Sensors* 2017, 17, 345.

31 Ahmed, E.; Benmokrane, B.; Deblois, R. Field testing of GFRP-reinforced concrete bridges in Quebec. In *Proceedings of the SHMII 2015—7th International*

Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Torino, Italy, 1–3 July 2015.

32 Tang, F.; Zhou, G.; Li, H.-N.; Verstrynge, E. A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures. *Constr. Build. Mater.* 2021, 313, 125578.

33 Bonilla, J.T.G.; Bonilla, H.G.; Betancourt, V.M.R.; Zamora, A.C.; Morales, M.E.S.; Ortiz, L.G.; Bonilla, A.G. Signal Analysis, Signal Demodulation and Numerical Simulation of a Quasi-Distributed Optical Fiber Sensor Based on FDM/WDM Techniques and Fabry-Pérot Interferometers. *Sensors* 2019, 19, 1759.

34 Barrias, A.; Casas, J.R.; Villalba, S. Application study of embedded Rayleigh based Distributed Optical Fiber Sensors in concrete beams. *Procedia Eng.* 2017, 199, 2014–2019.

35 Berrocal, C.G.; Fernandez, I.; Bado, M.F.; Casas, J.R.; Rempling, R. Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing. *Struct. Health Monit.* 2021, 20, 3309–3326.

36 Bertulesi, M.; Bignami, D.F.; Boschini, I.; Brunero, M.; Ferrario, M.; Menduni, G.; Morosi, J.; Paganone, E.J.; Zambrini, F. Monitoring Strategic Hydraulic Infrastructures by Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors. *Water* 2022, 14, 188.

37 Morgese, M.; Domaneschi, M.; Ansari, F.; Cimellaro, G.P.; Inaudi, D. Improving Distributed Fiber-Optic Sensor Measures by Digital Image Correlation: Two-Stage Structural Health Monitoring. *ACI Struct. J.* 2021, 118, 91–102.

38 Xu, J.; Yuan, G.; Zhang, J.; Tu, Y. A long term cost effective slop safety monitoring using emergency activated Brillouin optic fiber sensors. In *Proceedings of the 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering and Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum, ICHCE and SWIDR*, Nanjing, China, 6–8 November 2021; pp. 972–975.

39 Yuan L., Wang Q., Zhao Y. A wavelength-time division multiplexing sensor network with failure detection using fiber Bragg grating (2024) *Optical Fiber Technology*, 88, DOI: 10.1016/j.yofte.2024.103818

40 Becks, H.; Baktheer, A.; Marx, S.; Classen, M.; Hegger, J.; Chudoba, R. Monitoring concept for the propagation of compressive fatigue in externally prestressed concrete beams using digital image correlation and fiber optic sensors. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2023, 46, 514–526

41 Nikonova, T.; Zharkevich, O.; Dandybaev, E.; Baimuldin, M.; Daich, L.; Sichkarenko, A.; Kotov, E. Developing a Measuring System for Monitoring the Thickness of the 6 m Wide HDPE/LDPE Polymer Geomembrane with Its Continuous Flow Using Automation Equipment. *Appl. Sci.* 2021, 11, 10045.

42 Mekhtiyev, A.D.; Yurchenko, A.V.; Neshina, Y.G.; Alkina, A.D.; Kozhas, A.K.; Zholmagambetov, S.R. Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2020, 56, 179–190. [CrossRef]

43 Mekhtiyev, A.; Bulatbayev, F.; Neshina, Y.; Siemens, E.; Alkina, A.;

Shaigarayeva, T. The external mechanical effects on the value of additional losses in the telecommunications fiber optic cables under operating conditions. In Proceedings of the 6th International Conference on Applied Innovation in IT, Koethen, Germany, 13 March 2018; Volume 1, pp. 123–127. [CrossRef]

44 Yurchenko, A.V.; Mekhtiyev, A.D.; Bulatbayev, F.N.; Neshina, Y.G.; Alkina, A.D. The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2018, 54, 528–533. [CrossRef]

45 Yurchenko, A.; Mekhtiyev, A.; Alkina, A.; Yugai, V. Passive Perimeter Security Systems Based on Optical Fibers Of G 652 Standard. In Proceedings of the International Conference on Applied Innovation in IT, Denpasar, Bali, Indonesia, 21–22 September 2019; Volume 7, pp. 31–36. Available online: https://icaiit.org/proceedings/7th_ICAIIT_1/1_6_Yurchenko.pdf (accessed on 5 March 2023).

46 Yurchenko, A.V.; Mekhtiyev, A.D.; Bulatbaev, F.N.; Neshina, Y.G.; Alkina, A.D.; Madi, P.S. Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 516, 012004.

47 Yang, D. Li, J. Tao, Y. Fang, X. Mao and W. Tong, "An optical fiber comprehensive analysis system for spectral-attenuation and geometry parameters measurement," 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Singapore, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/CLEOPR.2017.8118861.

48 H. Zhou et al., "Research on fiber nonlinear coefficient," 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, China, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICOON.2017.8121350.

49 C. Xiao, J. Long, L. Jiang, G. Yan and Y. Rao, "Review of Sensitivity-enhanced Optical Fiber and Cable Used in Distributed Acoustic Fiber Sensing," 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Shenzhen, China, 2022, pp. 359-363, doi: 10.1109/ACP55869.2022.10089130.

50 R. P. M. Julie, T. D. Abbott, J. P. Burger and R. Siebrits, "A Novel High-Resolution Optical Time Delay Cable Measurement System Utilized in Fiber Verification in Radio Interferometry," 2018 *IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*, Olympic Valley, CA, USA, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/FCS.2018.8597450.

51 L. A. Sánchez, C. A. Álvarez-Ocampo, M. Delgado-Pinar, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, "Modal Analysis of Acoustic Resonances in an Optical Fiber: All-Optical Excitation and Detection," 2023 *23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON59386.2023.10207503.

52 K. Yang, C. Liao, S. Liu, J. He, J. Wang and Y. Wang, "Optical Fiber Tag Based on an Encoded Fiber Bragg Grating Fabricated by Femtosecond Laser," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 6, pp. 1474-1479, 15 March 15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2956178.

53 M. A. Melkumov et al., "Bismuth-doped optical fiber amplifier for 1430 nm band pumped by 1310 nm laser diode," 2011 Optical Fiber

Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, USA, 2011, pp. 1-3.

54 P. Barcik, P. Munster, P. Dejdar, T. Horvath and J. Vojtech, "Measurement of Polarization Transient Effects Caused by Mechanical Stress on Optical Fiber," 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 26-28, doi: 10.1109/FOAN.2019.8933658.

55 L. Yang et al., "Diameter-reduced fiber with ultra-low bending loss," 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Shenzhen, China, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICOON55511.2022.9901127.

56 C. Wang *et al.*, "High Sensitivity Distributed Static Strain Sensing Based on Differential Relative Phase in Optical Frequency Domain Reflectometry," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 20, pp. 5825-5836, 15 Oct.15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.3003584.

57 B. -h. Tang and Z. -x. Zhou, "The design of communication network optical fiber cable condition monitoring system based on distributed optical fiber sensor," 2018 International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2018, pp. 97-101, doi: 10.1109/ELTECH.2018.8401433.

58 H. Shou et al., "Addressable Brillouin Random Fiber Lasing Resonance with High Optical Signal-to-Noise Ratio for Distributed Vibration Sensing," 2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, China, 2023, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC56963.2023.10209886.

59 A. M. Rocha, F. Domingues, M. Facão and P. S. André, "Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber," 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, Stockholm, Sweden, 2011, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICTON.2011.5971025.

60 P. Bašić, "Fiber Optic Sensor Cable Based on Hollow Capillary Tube with Three Tightly Encapsulated Optical Fibers," 2019 2nd International Colloquium on Smart Grid Metrology (SMAGRIMET), Split, Croatia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.23919/SMAGRIMET.2019.8720367.

61 Y. Zhao et al., "A novel fiber Michelson interferometer based on cascaded twin core fiber and side-hole fiber," 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), Jeju, Korea (South), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1117/12.2264871.

62 M. M. Khudyakov et al., "Combined Method for SBS Suppression in High Numerical Aperture Single-Mode Optical Fibers," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 34, no. 20, pp. 1069-1072, 15 Oct.15, 2022, doi: 10.1109/LPT.2022.3200152.

63 T. Yang et al., "Design of a Weak Fiber Bragg Grating Acoustic Sensing System for Pipeline Leakage Monitoring in a Nuclear Environment," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 20, pp. 22703-22711, 15 Oct.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3098313.

64 Q. Qin *et al.*, "Twelve-Wavelength-Switchable Thulium-Doped Fiber Laser with a Multimode Fiber Bragg Grating," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 1-10, June 2021, Art no. 7100710, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3084929.

65 G. M. Isoe *et al.*, "Noise figure and pump reflection power in SMF-reach optical fibre for raman amplification," *AFRICON 2015*, Addis Ababa, Ethiopia, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/AFRCON.2015.7332036.

66 R. Caspary *et al.*, "Single-mode polymer optical fibers," 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Austria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2014.6876464.

67 Kalizhanova A, Kunelbayev M, Wojcik W, Kozbakova A, Aitkulov Z, Malikova F. Development of Fiber-Optic Sensors System, Based on Fiber Bragg Gratings. *Journal of Ecological Engineering*. 2022;23(10):98-106. doi:10.12911/22998993/152363.

68 Alfredo Güemes Dpt. Aeronautics, Univ. Politécnica de Madrid Plaza Cardenal Cisneros, 3 MADRID 28040 SPAIN. *Fiber Optics Strain Sensors 2019 years*.

69 Ramakrishnan, M.; Rajan, G.; Semenova, Y.; Farrell, G. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors* 2018, 16, 99.

70 Chen, J.; Liu, B.; Zhang, H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Front. Optoelectron. China* 2021, 4, 204–212.

71 Hoult N. A., Ekim O., Regier R. Damage/deterioration detection for steel structures using distributed fiber optic strain sensors // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2014. – T. 140. – №. 12. – C. 04014097.

72 Bertulesi, M.; Bignami, D.F.; Boschini, I.; Longoni, M.; Menduni, G.; Morosi, J. Experimental Investigations of Distributed Fiber Optic Sensors for Water Pipeline Monitoring. *Sensors* 2023, 23, 6205.

73 Boateng E., Schubel P., Umer R. 2019. Thermal isolation of FBG optical fibre sensors for composite cure monitoring. *Sensors and Actuators A*, 287, 158–167.

74 M. Leblanc, S. Y. Huang, M. M. Ohn, A. Güemes, and A. Othonos, Distributed strain measurement based on a fiber Bragg grating and its reflection spectrum analysis. *Optical Letters*, vol. 21, n. 17, pp. 1405-1407, 1996.

СЫН-ПІКІР

«7M06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының магистранты

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлының

магистрлік диссертация жұмысына

Тақырыбы: «Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу»

Орындалды:

а) теориялық және практикалық бөлімі ~~70~~ бет

б) графикалық бөлімі ~~24~~ бет

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУЛЕР

Диссертант Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлының магистрлік диссертациялық жұмысы заманауи құрылыс конструкцияларын бақылау саласындағы өзекті мәселелерді шешуге бағытталған. Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық датчиктерді зерттеу және оларды бетон конструкцияларында қолдану мәселесі терең талданды. Жұмыста технологияның артықшылықтары айқын көрсетілген, конструкциялардың қауіпсіздігі мен беріктігін қамтамасыз ету бойынша құнды ғылыми ұсыныстар берілген.

Диссертацияның құрылымы жүйелі, материалдың мазмұны мен презентациясы дәйекті. Теориялық талдау мен практикалық ұсыныстардың үйлесімі жұмыстың жоғары ғылыми деңгейде орындалғанын көрсетеді. Жұмыс тақырыбы өзекті болғандықтан және нәтижелер нақты практикалық мәнге ие болғандықтан, диссертация қорғауға толығымен лайық деп санаймын.

Жұмысты бағалау

Жалпы бағалай кетсем, егер нақты объектілерде жүргізілген эксперименттердің деректері және оны практикалық ету үшін кәсіпорындардың мүдделері туралы ақпарат толықтырылса, жұмыс тиімдірек болатынын атап өткен жөн. Қорытындылай айтқанда, диссертант өзінің білімі мен зерттеу қабілеттерін жоғары деңгейде көрсетті деп санаймын. Менің ойымша, диссертант Ысырайыл Қ.М. «7M06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасын бойынша “техника ғылымдарының магистрі” академиялық дәрежесін алуға және «өте жақсы» (А, 90%) бағалануға лайық деп санаймын.

Рецензент

Energo University,

«Телекоммуникациялық инженерия»

кафедрасының қауым. профессоры, PhD, т.ғ.к

Ермекбаев М.М.

(қолы)

«13»

Желтоқсан

2024 ж.

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю

Сәтжан

Қызметі

«13»

12

аты

20

ж.



**«7М06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының
магистранты**

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы
магистрлік диссертациясына

СЫН-ПІКІР

**Тақырыбы: «Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды
талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу»**

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлының магистрлік диссертациялық жұмысы құрылыс конструкцияларының қауіпсіздігін қамтамасыз ету және олардың ұзақ мерзімділігін арттыру мәселелерін зерттеуге арналған. Брэгг торлары негізіндегі талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану бойынша ұсынылған әдістердің жоғары сезімталдық, дәлдік және ұзақ қызмет ету мерзімі сияқты артықшылықтары нақты дәлелденген. Жұмыс теориялық және практикалық тұрғыдан маңызды, себебі құрылыс конструкцияларын бақылаудың заманауи құралдарын қолдану инфрақұрылымның сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыруға ықпал етеді.

Диссертация құрылымы логикалық тұрғыда дұрыс ұйымдастырылған, зерттеу нәтижелері нақты және дәйекті түрде баяндалған. Талшықты-оптикалық сенсорларды бетон конструкцияларында пайдалану мүмкіндіктері терең зерттеліп, олардың тиімділігі дәлелденген. Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы мен қолданбалы маңыздылығын атап өте отырып, диссертант Ысырайыл Қ.М. «7М06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесін алуға және «өте жақсы» (А+, 95%) бағалануға лайық деп санаймын.

Пікір беруші
ЭТжҒТ каф.
Профессор, Р.И.



Смайлов Н.К.

**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: Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы

Тақырыбы: Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 8.2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 2.7

Дәйексөз (35): 0.2

Әріптерді ауыстыру: 1

Аралықтар: 3

Шағын кеңістіктер: 7

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:

10.01.2025 г.
Күні



Таштай Е.
Кафедра меңгерушісі

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 8.2

Коэффициент Подобия 2: 2.7

Микропробелы: 7

Знаки из здругих алфавитов: 1

Интервалы: 3

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:

10.01.2025 г.
Дата

Марксұлы С.
проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Құрылыс конструкцияларына арналған интеллектуалды талшықты-оптикалық деформация датчиктерін зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 8.2

Коэффициент Подобия 2: 2.7

Микропробелы: 7

Знаки из здругих алфавитов: 1

Интервалы: 3

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:

10.01.2025 г.
Дата



Таштай Е.
Заведующий кафедрой