**Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі**

Коммерциялық емес акционерлік қоғам «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті»

ӘОЖ 621.396.67

Қолжазба құқығында

**НУРЖАУБАЕВА ГУЛЬСАЯ САКЕНОВНА**

# Текстиль негіздегі киетін микрожолақты антенналарды зерттеу және әзірлеу

8D06201 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Философия докторы (PhD) дәрежесін алуға арналған диссертация

Ғылыми жетекші: PhD,
қауымдастырылған профессор
Қадылбекқызы Эльвира

Шетелдік ғылыми жетекші:
PhD, ассистент-профессор
Норшакила Харис

Қазақстан Республикасы
Алматы, 2026

**МАЗМҰНЫ**


| | |
|---|---|
| КІРІСПЕ | 8 |
| 1 ТЕКСТИЛЬДІ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ | 15 |
| 1.1 IoT-қа арналған киетін микрожолақты антенналардың қолданылу аясы | 15 |
| 1.2 Текстильді материалдар мен оларды дайындау технологиялары бойынша ғылыми әдебиеттерге шолу | 21 |
| 1.3 Зерттеуде пайдаланылған текстильді материалдар мен өткізгіштердің электрофизикалық қасиеттері | 25 |
| 1.4 IoT-қа арналған қолданыстағы киетін антенналарға шолу және топологияларды таңдауды негіздеу | 27 |
| 1-бөлім бойынша қорытынды | 37 |
| 2 КИЕТІН МИКРОЖОЛАҚТЫ АНТЕННАЛАРДЫ ЖОБАЛАУ ӘДІСТЕМЕСІ ЖӘНЕ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІ | 38 |
| 2.1 Қоректендіру тәсілдері және жобалау әдістемесі | 38 |
| 2.2 Антенна сипаттамаларын бағалаудағы өлшемшарттар | 45 |
| 2-бөлім бойынша қорытынды | 48 |
| 3 ТЕКСТИЛЬДІ ТӨСЕНІШТЕГІ ЕКІ ЭЛЕМЕНТТІ СЫЗЫҚТЫҚ АНТЕННА ТОРЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ | 49 |
| 3.1 Антенна конструкциясы, геометриялық параметрлері және модельдеу нәтижелері | 49 |
| 3.2 Антеннаның механикалық деформацияларға төзімділігін зерттеу | 62 |
| 3.3 Антеннаның электромагниттік қауіпсіздігін бағалау | 65 |
| 3.4 Текстильді материалдардың антенна сипаттамаларына әсері | 68 |
| 3-бөлім бойынша қорытынды | 71 |
| 4 ТЕКСТИЛЬДІ ТӨСЕНІШТЕГІ ЯГИ–УДА АНТЕННАСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ | 72 |
| 4.1 Антенна конструкциясы, геометриялық параметрлері және модельдеу нәтижелері | 72 |
| 4.2 Антеннаның механикалық деформацияларға төзімділігін зерттеу | 85 |
| 4.3 Антеннаның электромагниттік қауіпсіздігін бағалау | 88 |
| 4-бөлім бойынша қорытынды | 90 |
| 5 ЕКІ ЭЛЕМЕНТТІ СЫЗЫҚТЫҚ АНТЕННА ТОРЫ МЕН ЯГИ–УДА АНТЕННАСЫНЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН САЛЫСТЫРУ | 92 |
| 5-бөлім бойынша қорытынды | 94 |
| ҚОРЫТЫНДЫ | 96 |
| ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ | 99 |
| А ҚОСЫМШАСЫ | 109 |

## НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Осы диссертациялық жұмыста келесі стандарттарға сілтемелер пайдаланылды:

«Жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім берудің мемлекеттік жалпыға міндетті стандарттарын бекіту туралы» Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрінің 2022 жылғы 20 шілдедегі № 2 бұйрығы (өзгерістер мен толықтырулар енгізілген). Астана, 2022.

«Диссертациялар мен автореферaттарды рәсімдеу жөніндегі нұсқаулық», ҚР Білім және ғылым министрлігі, Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті. Алматы, 2004.

ГОСТ 7.32–2017. Ақпарат, кітапхана және баспа ісі бойынша стандарттар жүйесі. Ғылыми-зерттеу жұмысы туралы есеп. Құрылымы және рәсімдеу ережелері. – 01.07.2018 бастап қолданысқа енгізілді.

ГОСТ 7.1–2003. Библиографиялық жазба. Библиографиялық сипаттама. Құрастырудың жалпы талаптары мен ережелері.

ҚР СТ 34.007-2002. Ақпараттық технология. Телекоммуникациялық желілер. Негізгі терминдер мен анықтамалар.

IEC/IEEE 62704-1:2017. 30 МГц – 6 ГГц диапазонындағы сымсыз байланыс құрылғыларынан адам денесінде пайда болатын кеңістіктік орташа алынған меншікті жұтылу коэффициентінің (МЖК) ең жоғары мәнін FDTD әдісімен анықтау.

IEEE 802.11. Сымсыз жергілікті желілер (WLAN) стандарты.

# АНЫҚТАМАЛАР

Осы диссертациялық жұмыста тиісті анықтамаларымен бірге келесі терминдер қолданылады:

Антенна торы – бірнеше сәулелендіргіш элементтен тұратын, олардың өзара әрекеттесуі жеке сәулелендіргішпен салыстырғанда күшейту коэффициенті мен бағытталу қасиетін арттыруды қамтамасыз ететін антенналық жүйе.

Адам денесінің воксельдік моделі – адам денесінің шағын көлемдік элементтерден (воксельдерден) тұратын үш өлшемді моделі, CST Studio Suite ортасында меншікті жұтылу коэффициентін (МЖК) сандық модельдеу үшін пайдаланылады.

Диаграмма бағыттылығы – антенна шығаратын электромагниттік өрістің кеңістіктің әртүрлі бағыттарындағы салыстырмалы қарқындылығының графикалық бейнеленуі.

Директор – Яги–Уда антеннасының көршілес элементтермен салыстырғанда резонанстық ұзындығы қысқа, сыйымдылықтық реактивтілік енгізетін және сәулеленуді өз бағыты бойынша күшейтетін пассивті элементі.

Диэлектрлік өтімділік ($\varepsilon_r$) – материалдағы электромагниттік өрістің баяулау дәрежесін сипаттайтын және антеннаның резонанстық жиілігі мен геометриялық өлшемдеріне тікелей әсер ететін физикалық шама.

Жерге тұйықтау қабаты (ground plane) – микрожолақты антеннаның кері жағында орналасқан, кері бағыттағы сәулеленуді азайтатын және пайдаланушының денесін антеннаның әсерінен экрандайтын тұтас өткізгіш қабат.

Импеданстық сәйкестендіру – антеннаның кіріс кедергісін қоректендіру желісінің толқындық кедергісіне (әдетте 50 Ом) сәйкестендіру процесі.

Заттар интернеті, IoT (Internet of Things) – сенсорлар мен коммуникациялық модульдер арқылы деректерді жинауды, өңдеуді және алмасуды қамтамасыз ететін өзара байланысқан құрылғылар жүйесі.

Сәулеленудің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) – антеннаға берілетін қуаттың қандай бөлігі пайдалы сәулеленуге түрлендірілетінін көрсететін шама.

Күшейту коэффициенті (КК, gain) – сәулелену тиімділігі мен берілген бағыттағы бағытталу қасиетін бір мезгілде сипаттайтын, dBi-мен өлшенетін антенна параметрі.

Киетін антенна – киімге немесе аксессуарларға біріктіруге және тікелей адам денесіне орналастыруға арналған икемді әрі жеңіл конструкциялы антенна.

Кері шығындар / шағылу коэффициенті ($S_{11}$, return loss) – антенна кірісіне берілген қуаттың қандай бөлігі кері шағылатынын көрсететін параметр; тиімді жұмыс істеуі үшін оның мәні –10 dB-ден төмен болуы тиіс.

Резонанстық жиілік – антеннаның кіріс кедергісі тек активті сипатқа ие болатын және сәулелену тиімділігі максималды мәнге жететін жиілік.

Рефлектор – Яги–Уда антеннасының көршілес элементтермен салыстырғанда резонанстық ұзындығы үлкен, индуктивтік реактивтілік енгізетін және сәулеленуді қарама-қарсы бағытта шағылдыратын пассивті элементі.

Диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсі (tg δ) – материалдағы электромагниттік энергияның жылу энергиясына түрлену дәрежесін сипаттайтын және антеннаның сәулелену тиімділігі мен күшейту коэффициентіне әсер ететін шама.

Текстильді төсеніш – киетін антенна конструкциясында диэлектрлік негіз ретінде пайдаланылатын мата материалы (фетр, джинс матасы, полиэстер, мақта мата).

Кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті (КТТК, VSWR) – антенна импедансының қоректендіру желісімен сәйкестену дәрежесін көрсететін көрсеткіш; тиімді жұмыс істеуі үшін 1-ден 2-ге дейінгі аралықта болуы тиіс.

Меншікті жұтылу коэффициенті (МЖК, Specific Absorption Rate, SAR) – биологиялық тіннің бірлік массасы жұтатын электромагниттік энергия мөлшерін сипаттайтын, антеннаның адам ағзасы үшін қауіпсіздігін бағалау кезінде қолданылатын және Вт/кг-мен өлшенетін шама.

Иілуге төзімділік – механикалық деформация (иілу, бүгілу) кезінде антеннаның электродинамикалық сипаттамаларын ($S_{11}$, бағыттылық диаграммасын, күшейту коэффициентін) сақтау қабілеті.

Активті элемент (driven element) – тарату желісінен тікелей қоректенетін антенналық жүйенің негізгі сәулелендіргіш элементі.

Яги–Уда антеннасы – бір активті элементтен және бірнеше пассивті элементтен (рефлектор мен директорлардан) тұратын, жоғары бағытталған әсер коэффициентіне ие директорлық типтегі антенна.

ICNIRP – сәулеленбейтін иондаушы сәулеленуден қорғау жөніндегі халықаралық комиссияның нормасы, МЖК мәнін 10 г тінге орташаланған 2,0 Вт/кг деңгейімен шектейді (Еуропалық Одақ стандарты).

FCC/IEEE – АҚШ Федералдық байланыс комиссиясының нормасы, МЖК мәнін 1 г тінге орташаланған 1,6 Вт/кг деңгейімен шектейді.

## БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

*Қысқартулар:*
Гц, кГц, МГц, ГГц – герц, килогерц, мегагерц, гигагерц (жиілік бірліктері);
БД – бағытталу диаграммасы;
dB – децибел;
dBi – изотропты сәулелендіргішке қатысты децибел (күшейту коэффициенті мен бағытталған әсер коэффициентінің өлшем бірлігі);
БӘК – бағытталған әсер коэффициенті;
ПӘК – сәулеленудің пайдалы әсер коэффициенті (радиациялық тиімділік);
КТТК (VSWR) – кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті (Voltage Standing Wave Ratio);
КК – күшейту коэффициенті;
МЖК (SAR) – меншікті жұтылу коэффициенті (Specific Absorption Rate);
АМС – жасанды магниттік өткізгіш (Artificial Magnetic Conductor);
CRLH – композиттік оң-сол жақты құрылым (Composite Right/Left-Handed);
CST – CST Studio Suite электродинамикалық модельдеу бағдарламалық кешені;
DGS – жерге тұйықтау қабатының ақаулы құрылымы (Defected Ground Structure);
EBG – электромагниттік тыйым салынған аралық құрылымы (Electromagnetic Band Gap);
EIRP – эквивалентті изотропты сәулелену қуаты (Equivalent Isotropically Radiated Power);
F/B – алға/артқа бағыттағы сәулелену қатынасы (Front-to-Back ratio);
FCC – АҚШ Федералдық байланыс комиссиясы (Federal Communications Commission);
FDTD – уақыт аймағындағы ақырлы айырмалар әдісі (Finite-Difference Time-Domain);
FEM – ақырлы элементтер әдісі (Finite Element Method);
FIT – ақырлы интегралдау әдісі (Finite Integration Technique);
FR-4 – эпоксидті шайыр негізіндегі шынытекстолит (стандартты қатты негіз);
GPS – жаһандық позициялау жүйесі (Global Positioning System);
ICNIRP – Иондаушы емес сәулеленуден қорғау жөніндегі халықаралық комиссия (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection);
IoT – Заттар интернеті (Internet of Things);
ISM – өнеркәсіптік, ғылыми және медициналық жиіліктер диапазоны (Industrial, Scientific and Medical);
MIMO – бірнеше таратқыш және қабылдағыш антенналары бар жүйе (Multiple-Input Multiple-Output);
NanoVNA – портативті векторлық тізбек анализаторы;
PBG – фотондық тыйым салынған аралық (Photonic Band Gap);
PDMS – полидиметилсилоксан;
PIFA – жазық инверсияланған F-антенна (Planar Inverted-F Antenna);
PLA – полилактид (биологиялық ыдырайтын полимерлі негіз);
RFID – радиожиіліктік сәйкестендіру (Radio Frequency Identification);
SIW – негізге кіріктірілген толқынөткізгіш (Substrate Integrated Waveguide);

SMA – А типті субминиатюралық коаксиалдық қосқыш (SubMiniature version A);
SRR – саңылауы бар сақиналы резонатор (Split-Ring Resonator);
UWB – аса кең жолақты (Ultra-Wideband);
VNA – векторлық тізбек анализаторы (Vector Network Analyzer);
WBAN – сымсыз денелік желі (Wireless Body Area Network);
WiMAX – кең жолақты сымсыз қолжетімділік технологиясы (Worldwide Interoperability for Microwave Access);
WLAN – сымсыз жергілікті желі (Wireless Local Area Network).

*Шартты белгілер:*
$c$ – вакуумдағы жарық жылдамдығы, м/с;
$D$ – бағытталған әсер коэффициенті, dBi;
$D_p$ – тордың сәулелендіргіш элементтері арасындағы қашықтық, мм;
$E$ – электр өрісінің кернеулігі, В/м;
$f_0$ – жұмыс (резонанстық) жиілігі, ГГц;
$G$ – іске асырылған күшейту коэффициенті, dBi;
$g$ – Яги–Уда антеннасының элементтері арасындағы байланыс саңылауы, мм;
$h$ – диэлектрлік негіздің қалыңдығы, мм;
$J$ – индукцияланған ток тығыздығы, А/м²;
$k$ – толқындық сан, рад/м;
$k_D$, $k_R$ – директордың қысқарту және рефлектордың ұзарту коэффициенттері;
$L$, $W$ – сәулелендіргіш патчтың резонанстық ұзындығы мен ені, мм;
$L_{eff}$ – патчтың тиімді электрлік ұзындығы, мм;
$L_F$, $W_F$ – қоректендірудің микрожолақты желісінің ұзындығы мен ені, мм;
$\Delta L$ – патчтың шеткі ұзартылуы, мм;
$N$ – тордың сәулелендіргіш элементтерінің саны;
$P_{сәул}$, $P_{бер}$ – сәулеленген және берілген қуат, Вт;
$S_{11}$ – антенна кірісіндегі шағылу коэффициенті, dB;
$x_0$ – қоректендіру нүктесінің патч жиегіне қатысты ығысуы, мм;
$Z_0$ – қоректендіру трактының толқындық кедергісі (50 Ом);
$Z_т$ – ширек толқынды трансформатордың сипаттамалық кедергісі, Ом;
$\beta$ – тор элементтеріндегі қоздырушы токтардың фазалар айырымы, град;
$\Gamma_{кіріс}$ – антенна кірісіндегі кернеу бойынша шағылу коэффициенті;
$\delta_f$ – резонанстық жиіліктің салыстырмалы қателігі, %;
$\varepsilon_r$ – негіздің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі;
$\varepsilon_{eff}$ – тиімді салыстырмалы диэлектрлік өтімділік;
$\eta_{сәул}$ – радиациялық тиімділік (сәулеленудің ПӘК-і), %;
$\lambda_0$ – еркін кеңістіктегі толқын ұзындығы, мм;
$\lambda_g$ – микрожолақты құрылымдағы бағытталатын толқын ұзындығы, мм;
$\rho$ – биологиялық тіннің көлемдік масса тығыздығы, кг/м³;
$\sigma$ – меншікті электрөткізгіштік, См/м;
tg $\delta$ – диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсі;
$AF$ – антенна торының көбейткіші (Array Factor).

# КІРІСПЕ

Талдамалық агенттіктердің мәліметтері әлемде қолданылатын IoT-құрылғылар санының жыл сайын тұрақты өсіп отырғанын көрсетеді. Бұл үрдіске бірнеше фактор әсер етеді. Олардың қатарында электрондық компоненттер құнының төмендеуі, энергия тиімділігі жоғары сымсыз байланыс хаттамаларының дамуы және денсаулық көрсеткіштері мен физикалық белсенділікті қашықтан әрі үздіксіз бақылауға мүмкіндік беретін дербестендірілген қызметтерге сұраныстың артуы бар. Осы факторлардың нәтижесінде киетін электроника (wearable) нарықтың қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының біріне айналды.

Киетін құрылғыларды әзірлеу Қазақстанда жүріп жатқан цифрлық трансформациямен тікелей байланысты. Цифрландыру мен телекоммуникацияны дамыту мемлекеттік деңгейде басым бағыт ретінде бекітілген. ҚР Үкіметі цифрлық трансформацияның, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар саласы мен киберқауіпсіздікті дамытудың 2023–2029 жылдарға арналған тұжырымдамасын қабылдады [1], ал 2026 жыл Цифрландыру және жасанды интеллект жылы болып жарияланды [2]. Заттар интернеті (IoT) қазір өнеркәсіптік процестерді бақылауда, көлік жүйелерінде, денсаулық сақтауда және қалалық инфрақұрылымда қолданылады [3].

IoT-тің жылдам өсіп келе жатқан тармағына адам денесінде немесе киімде орналасатын құрылғылар жатады. Олар адамның физиологиялық күйін және айналасындағы орта параметрлерін үздіксіз тіркейді. Медицинада мұндай құрылғылар арқылы пациенттің жүрек соғу жиілігі, артериялық қысымы мен дене температурасы қашықтан бақыланады [4, 5], спортта жаттығу кезіндегі белсенділік есепке алынады. Ақылды қала мен қауіпсіздік жүйелерінде оларды жедел байланыс үшін және адамның орналасқан жерін анықтау үшін пайдалануға болады.

Бұл қолданбалардың бәрі сымсыз арнаның сенімділігіне тәуелді. Тығыз қала құрылысында сигнал ғимараттардан шағылысады, ал антенна денеге жақын орналасқанда сәулелену энергиясының бір бөлігін адам денесінің тіндері жұтады. Сондықтан 5G/6G желілері мен ақылды қала жүйелеріне арналған шешімдерде антенна мен радиоарнаны осы жағдайларға бейімдеу қажет. Мұндай шешімдердің бір бөлігі автор бірлесіп жазған монографияда [6] сипатталған.

Әдеби деректерге сәйкес киетін IoT-құрылғылар қолданылу салалары бойынша (медицина, спорт, қауіпсіздік, ойын-сауық) және конструкциялық форм-факторы бойынша (білезіктер, бас киімге орнатылатын модульдер, жилеттер, көзілдіріктер, теріге жапсырылатын патчтар, қолға тағылатын таңғыштар) жіктеледі. Мұндай форм-факторлардың алуан түрлілігі антенналық жүйелерге өзара қайшы талаптар қояды: бір жағынан, конструкцияның ықшамдылығы мен төмен профильділігі қажет болса, екінші жағынан, тасымалдаушының пішіні мен материалына қарамастан тұрақты электродинамикалық сипаттамаларды сақтау талап етіледі.

Киетін IoT-құрылғының сымсыз байланыс сапасы мен сенімділігін анықтайтын негізгі компоненттердің бірі антенна болып табылады. Ол электрлік

сигналдарды электромагниттік толқындарға түрлендіріп, қабылдау кезінде кері түрлендіруді жүзеге асырады. Осы арқылы құрылғының сыртқы желімен сымсыз байланысы қамтамасыз етіледі. Қазіргі кезде киетін IoT-шешімдерді кең көлемде енгізуге адам денесіне жақын немесе тікелей орналастыру кезінде антенна сипаттамаларының тұрақтылығын сақтау және электромагниттік қауіпсіздік талаптарын орындау мәселелері шектеу болып отыр.

Антенна адам денесіне жақын орналасқанда оны жобалау бірнеше себептен күрделенеді. Сәулеленген энергияның бір бөлігін биологиялық тіндер жұтады, сондықтан меншікті жұтылу коэффициентін (МЖК) шекті мәндермен салыстырып тексеру керек: FCC бойынша 1 г тінге 1,6 Вт/кг [7], ICNIRP бойынша 10 г тінге 2 Вт/кг [8]. Антеннаны киімге немесе аксессуарға кіріктіру үшін икемді текстиль қажет. Ал оның диэлектрлік өтімділігі мен шығын бұрышының тангенсі микрожолақты антенналарда әдетте қолданылатын қатты негіздердікінен өзгеше. Пайдалану кезінде антенна иіледі, созылады немесе қысылады. Геометрия өзгергенде резонанстық жиілік ығысады, сәйкестендіру нашарлайды. Бұл жұмыста деформация түрлерінің ішінен тек иілу зерттелді.

Қатты диэлектрлік негіздегі микрожолақты антенналар жақсы зерттелген және сымсыз байланыста кең қолданылады [9, 10]. Текстиль төсеніштегі антенналардың да көптеген конструкциялары ұсынылған [11, 12], олардың МЖК-сын бағалау әдістері де қалыптасқан [13, 14]. Яги–Уда антеннасы классикалық радиотехникадан белгілі: құрылымы қарапайым болғанымен, күшейту коэффициенті жоғары бағытталған антенна.

Жарияланған өлшеулерге сәйкес, киетін антенналарда пайдаланылатын флис, фетр, джинс матасы, полиэстер, мақта мата мен Cordura материалдарының салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі көбінесе 1,1–1,9 аралығында жатады [15–17]. Қатты негіздерде бұл мән 2,2-ден 12-ге дейін [18]. $\varepsilon_r$ төмен болғанда антеннаның өткізу жолағы кеңеюі мүмкін. Бірақ жұмсақ мата пішінін нашар ұстайды, сондықтан антенна геометриясын тұрақты сақтау қиындайды.

Өткізгіш қабат металдандырылған матадан, ток өткізгіш жіптен, мыс фольгадан немесе мыс таспадан жасалады. Дайындаудың кең тараған тәсілдері: өткізгіш жіппен кестелеу, өткізгіш бояумен трафареттік басу, қабаттарды желімдеу және көпқабатты жинау [11, 19, 20]. Таңдалған тәсілге бір партиядағы прототиптердің сипаттамалары бір-біріне қаншалықты сәйкес келетіні, антеннаның иілуге шыдамдылығы және ұзақ пайдаланғандағы сенімділігі байланысты.

Әдебиеттерде екі сұрақ ашық қалып отыр. Текстильді микрожолақты антенна торлары туралы жұмыстар аз емес [21, 22]. Алайда авторлар әртүрлі конструкциялар мен өлшеу әдістемелерін қолданатындықтан, түрлі маталардың антенна сипаттамаларына әсерін бір-бірімен тікелей салыстыру мүмкін емес.

Бағытталған антенналар саласында да шешілмеген мәселе бар. [23, 24] жұмыстардағы Яги–Уда антенналары 8–12,4 dBi күшейту коэффициентіне жетеді, бірақ олар қатты төсенішке немесе резонанстық қуысы бар металл негізге орналастырылған, мұндай конструкцияны киімге кіріктіру мүмкін емес. Толығымен текстильден жасалған бағытталған антенналардың күшейту коэффициенті 5,3–5,45 dBi-ден аспайды [25, 26]. Толық өлшемді Яги–Уда

топологиясын, жоғары күшейтуді және толық текстильді орындалуды бір конструкцияда біріктірген жұмыс әдебиеттерден табылмады.

Осы мәселелерді шешу үшін 2,45 ГГц жиілікке арналған екі текстильді микрожолақты антенна әзірленді: екі элементті сызықтық антенна торы және Яги–Уда антеннасы. Тордың иілуге төзімділігі прототипте өлшенді, Яги–Уда антеннасынікі модельдеуде бағаланды. Екі антенна үшін денеге жақын орналасқандағы МЖК мәндері есептеліп, FCC және ICNIRP шектерімен салыстырылды.

Жұмыс жиілігі ретінде лицензиясыз ISM диапазонындағы 2,45 ГГц алынды. Осы диапазонда Wi-Fi, Bluetooth және Zigbee жұмыс істейді, демек антеннаны сериялық IoT-модульдерімен бірге қолдануға болады. Бос кеңістікте толқын ұзындығы шамамен 122 мм, ал джинс матасындағы патчтың резонанстық ұзындығы 48 мм-ге жуық, яғни элемент киімге еркін сыяды. Жиілікті арттырса антенна кішірейеді, бірақ дене тіндеріндегі шығын өседі.

Жұмыстың мақсаты – 2,45 ГГц жиіліктегі текстиль негіздегі киетін микрожолақты антенналарды әзірлей отырып, төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің антенна параметрлеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау.

Осы мақсатқа сәйкес бес міндет қойылды:

1. Киетін микрожолақты антенналарды әзірлеу әдістерін талдау және анықтау.
2. Екі элементті антенна торын әзірлеу арқылы текстильді төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің антенна параметрлеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау.
3. Текстильді төсеніштердегі Яги–Уда антеннасын әзірлеу және оңтайландыру.
4. Әзірленген антенналардың механикалық деформацияларға төзімділігін зерттеу және олардың электромагниттік қауіпсіздігін бағалау.
5. Әзірленген киетін антенналардың екі топологиясының электродинамикалық сипаттамаларын зерттеу және салыстырмалы түрде бағалау.

Зерттеу объектісі – текстильді төсеніштегі киетін микрожолақты антенналар.

Зерттеу пәні – антеннаның геометриялық параметрлері, төсеніштің электрофизикалық қасиеттері, иілу және адам денесіне әсер ету факторларының электродинамикалық сипаттамалары мен МЖК-ға әсер ету заңдылықтары.

Зерттеу әдістері:

- CST Studio Suite 2024 бағдарламасында параметрлік оңтайландырумен толықтолқынды сандық модельдеу;
- фетр, джинс матасы, полиэстер және мақта мата төсеніштерінде ток өткізгіш мата мен мыс таспадан өткізгіш қабаттары бар прототиптер дайындау;
- прототиптердің $S_{11}$ коэффициентін NanoVNA 2024 векторлық тізбек анализаторымен өлшеу. Диаграмма бағыттылығы, күшейту коэффициенті мен радиациялық тиімділік тек модельдеу арқылы анықталды;

- радиусы 55–90 мм цилиндрлік беттерде иілудің резонанстық жиілікке, сәйкестендіруге және диаграмма бағыттылығына әсерін модельдеу, ал $S_{11}$ бойынша эксперимент арқылы тексеру;
- CST жүйесінде адам денесінің воксельдік моделінде меншікті жұтылу коэффициентін сандық модельдеу және оның ICNIRP мен FCC нормаларына сәйкестігін тексеру арқылы антеннаның электромагниттік қауіпсіздікті бағалау.

**Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы** келесі нәтижелерден тұрады:

1. Әртүрлі текстильді материалдардағы екі элементті антенна торы мен Яги–Уда антеннасын зерттеу негізінде текстильді төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің киетін микрожолақты антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары анықталды.

2. Алғаш рет барлық элементтері текстильді төсеніш қабатында орналасқан, кең сәулелену мен жоғары күшейту коэффициентін қамтамасыз ететін, киетін микрожолақты Яги–Уда антеннасының топологиясы ұсынылды.

**Қорғауға келесі негізгі қағидалар ұсынылады:**

1-қағида. Текстильді төсеніштегі екі элементті антенна торының күшейту коэффициенті мен радиациялық тиімділігі (ПӘК) өткізгіш қабат материалына емес, төсеніш қабат материалына тәуелді, сондықтан өткізгіш материалдарды өзара алмастырғанда антеннаның сәулелену сипаттамалары сақталады.

2-қағида. Барлық элементтері текстильді төсеніш қабатында орналастырылған, көпқабатты құрылымдарсыз және өтпелі тесіктерсіз әзірленген Яги–Уда антеннасының ұсынылған топологиясы иілгіштік қасиетін сақтай отырып, 2,45 ГГц ISM диапазонында 8,3–8,7 dBi күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді.

3-қағида. Текстильді төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігінің киетін микрожолақты антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылығы топологияға тәуелсіз: εr 1,45-тен 1,9-ға дейін артқанда екі элементті торда да, Яги–Уда антеннасында да бағыттылық пен күшейту коэффициенті төмендеп, бағытталу диаграммасының негізгі жапырақшасы кеңейеді.

Ғылыми нәтижелерді алудағы автордың жеке үлесі. Диссертацияда ұсынылған барлық түпнұсқалық нәтижелер, оның ішінде антенналардың геометриялық параметрлерін есептеу, CST Studio Suite бағдарламалық кешенінде электродинамикалық модельдеу, прототиптерді дайындау, эксперименттік өлшеулер жүргізу және алынған нәтижелерге салыстырмалы талдау жасау автордың өзі немесе өзінің тікелей қатысуымен жүзеге асырылды.

**Жұмысты сынақтан өткізу.** Диссертацияда ұсынылған зерттеудің негізгі нәтижелері мен әдістерін қамтитын «A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications» баяндамасы «Энергетика, инфокоммуникациялық технологиялар және жоғары білім» XII Халықаралық ғылыми-техникалық конференциясында (Алматы қ., 2022 ж., 20-21 қазан), «Comparative Study of Textile Based Wearable Antenna Designs for IoT Applications» баяндамасы IEEE SIST (Астана қ., 2026 ж.) халықаралық конференциясында баяндалды.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы әзірленген киетін текстильді микрожолақты антенна конструкцияларының (сызықтық антенна торы мен Яги–Уда антеннасының) медицина саласында, қауіпсіздік және құтқару қызметтерінің жүйелерінде, ақылды қала және спорттық мониторинг жүйелерінде, IoT-құрылғыларын жобалау кезінде тікелей қолданылу мүмкіндігімен айқындалады. Антеннаның текстильді материалдарының, механикалық деформациялануы және электромагниттік қауіпсіздігінің оның сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары антенна материалдары мен геометриясын негізделген түрде таңдаудың практикалық негізін қалыптастырады. Бұл зерттеу жұмыстары нәтижелерінің еңгізілгені 9 қыркүйек 2025 жылғы Малайзиялық теңіз инженерлік технологиялар институты (UniKL MIMET, Лумут қ., Малайзия) тарапынан берілген ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерін енгізу актісімен расталады. Аталған актіге сәйкес микрожолақты антенналардың күшейту коэффициентін арттырудағы ғылыми нәтижелері мен техникалық шешімдері осы институттың оқу үдерісіне енгізіліп, дәрістер мен зертханалық жұмыстарында пайдаланылады. Диссертациялық жұмыстың нәтижелері одан әрі де электроника тақырыбы бойынша тиісті ғылыми жобалар шеңберінде пайдаланылуы мүмкін.

**Жарияланымдар.** Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері келесі ғылыми басылымдарда жарияланды: «Аналитический обзор многослойной микрополосковой антенны Яги–Уда для приложений Интернета вещей (IoT)» шолу мақаласы «Научные труды ВИИРЭиС» журналында (2022); «A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications» мақаласы XII Халықаралық ғылыми-техникалық конференция материалдарында (2022); «Characterization of high impedance of multilayer coplanar waveguide transmission line design for integration with nanodevices» мақаласы Eastern-European Journal of Enterprise Technologies журналында (2022); «Evaluation of high frequency behavior of the coplanar waveguide transmission line for integration with self-switching nanodevice» мақаласы «Вестник Алматинского университета энергетики и связи» журналында (2022); «Design of the Wearable Microstrip Yagi-Uda Antenna for IoT Applications» мақаласы International Journal on Communications Antenna and Propagation, IRECAP журналында (2024); «The Development and analysis of a wearable textile Yagi-Uda antenna design for security and rescue purposes» мақаласы ҚР ҰҒА басылымдарында (2024); «Comparative Study of Textile Based Wearable Antenna Designs for IoT Applications» мақаласы IEEE SIST конференциясының материалдарында (2026); «Интеллектуальные телекоммуникационные решения для сетей 5G/6G и Smart City в условиях ультраплотной городской среды» ұжымдық монографиясы (Алдашева Л.С., Амирова А.С., Тусупов А.Д., Нуржаубаева Г.С., Әбдіраман Ә.С., «Дарын» баспасы, Алматы, 2026); «Performance Evaluation of Wearable Antenna Arrays for IoT Applications in Smart City» мақаласы International Journal of Antennas and Propagation журналында (2026); «Wearable Microstrip Antennas for IoT: A Comprehensive Review of Application Areas, Textile Materials, and Body-Centric Design Techniques» шолу мақаласы «Вестник Алматинского университета энергетики и связи» журналында (2026). Жарияланымдар Scopus дерекқорында индекстелетін

(процентильдері 47-63 %) басылымдардағы, сондай-ақ Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті (ҒЖБССҚК) ұсынған басылымдардағы еңбектерді қамтиды. Диссертация тақырыбы және сабақтас мәселелер бойынша барлығы 10 ғылыми еңбек жарияланды, соның ішінде Scopus дерекқорында индекстелетін басылымдарда 3 мақала, ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда 4 мақала, халықаралық конференциялар материалдарында 2 баяндама және 1 ұжымдық монография жарық көрді.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, бес тараудан, қорытындыдан, ғылыми еңбектер тізімінен және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшадан тұрады. Жұмыстың көлемі 109 бет, оның ішінде 42 сурет, 13 кесте, пайдаланылған әдебиеттер тізімінде 123 атау бар.

Кіріспеде тақырыптың өзектілігі, жұмыстың мақсаты мен міндеттері, зерттеу объектісі мен пәні, ғылыми жаңалығы және қорғауға шығарылатын қағидалар баяндалған. Автордың жеке үлесі, жұмыстың практикалық маңызы, сынақтан өтуі және жарияланымдар да осы жерде көрсетілген.

Бірінші тарау шолу сипатында. Онда IoT жүйелеріндегі киетін микрожолақты антенналардың қолданылу салалары, текстильді материалдардың түрлері және антенна дайындау технологиялары қарастырылған. 1.3-бөлімде зерттеуге алынған текстильді және өткізгіш материалдардың электрофизикалық параметрлері мен олардың антенна сипаттамаларына ықпалы талданған. Тарау әдебиеттегі киетін антенналарды салыстырумен және зерттеу үшін екі топологияның таңдалу негіздемесімен аяқталады.

Екінші тарауда екі антеннаға ортақ жобалау әдістемелері, нақтылай қоректендіру тәсілін таңдау негіздемесі, сәулелендіргіш пен қоректендіру желісінің өлшемдерін есептейтін аналитикалық өрнектер және бағалау өлшемшарттары (шағылу коэффициенті, кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті, радиациялық тиімділік) берілген.

Үшінші тарау екі элементті сызықтық антенна торына арналған. Тордың геометриялық параметрлері есептеліп, үш төсеніш (фетр, джинс матасы, полиэстер) пен екі өткізгіш материалдың (ток өткізгіш мата, мыс таспа) үйлесімінен тұратын алты конфигурация CST Studio Suite бағдарламасында модельденеді және оңтайландырылады. Модельдеу нәтижелері NanoVNA векторлық тізбек анализаторымен өлшенген $S_{11}$ мәндерімен салыстырылады. Бұл тарауда тордың 55–90 мм радиустармен иілгендегі сипаттамалары қарастырылып, адам денесінің воксельдік моделінде меншікті жұтылу коэффициенті есептеледі.

Төртінші тарауда текстильді төсеніштегі микрожолақты Яги–Уда антеннасы әзірленеді. Белсенді элементтің, рефлектор мен директорлардың өлшемдері анықталып, үш төсеніштегі (полиэстер, джинс матасы, мақта мата) конфигурациялар модельденеді. Есептік нәтижелер S11 бойынша өлшеу деректерімен тексеріледі. Антеннаның иілуге төзімділігі мен воксельдік модельдегі меншікті жұтылу коэффициенті үшінші тараудағы әдістемемен бағаланады.

Бесінші тарауда антенна торы мен Яги–Уда антеннасы бағыттылық коэффициенті, күшейту коэффициенті, негізгі жапырақшаның ені және радиациялық тиімділік бойынша салыстырылып, төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігінің әсер ету заңдылығының топологияға тәуелсіз екені көрсетіледі.

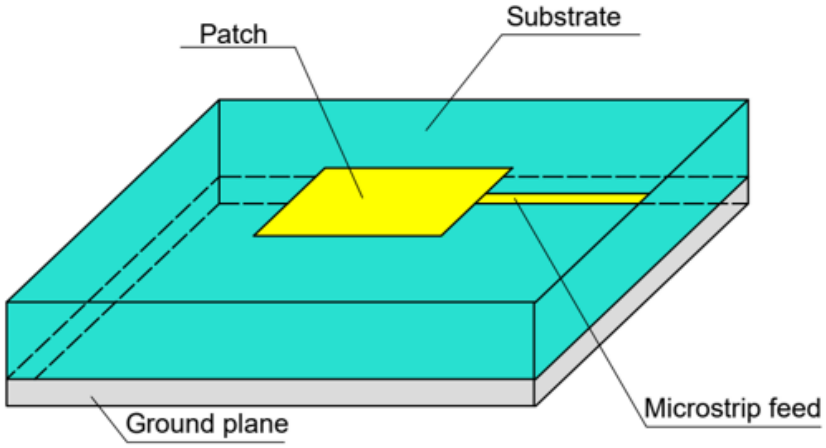
Қорытындыда қойылған міндеттер бойынша негізгі нәтижелер тұжырымдалып, киетін текстильді антенналарды әрі қарай зерттеу бағыттары көрсетіледі.

Қосымшада Малайзиялық теңіз инженерлік технологиялар институты (UniKL MIMET) берген ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерін енгізу актісі келтірілген.

## 1 Текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттері

### 1.1 IoT-қа арналған киетін микрожолақты антенналардың қолданылу аясы

Антенна таратқыштан келген электрлік сигналды кеңістікке таралатын электромагниттік толқынға айналдырады, ал қабылдау режимінде толқынды қайтадан электрлік сигналға түрлендіреді. Сымсыз байланыста қолданылатын антенналардың ішінде микрожолақты антенналар жиі зерттеледі: олар жұқа әрі жазық, қарапайым әдістермен арзан дайындалады және басқа схема элементтерімен бір платаға орналастырылады [27]. Классикалық микрожолақты антенна диэлектрлік төсеніштің бір бетіндегі металл резонанстық патчтан және екінші бетіндегі жерге тұйықтау қабатынан тұрады. Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі әдетте 2,2–12 аралығында болады. Тікбұрышты патч-антеннаның негізгі құрылымы [28] жұмыста толық сипатталған.




1 сурет – Микрожолақты желілік қоректендіруі бар микрожолақты антеннаның құрылымы: патч (Patch), төсеніш (Substrate), жерге тұйықтау қабаты (Ground plane) және микрожолақты қоректендіру желісі (Microstrip feed) [28]

Микрожолақты технологиямен патч-антенналардан бөлек баспа дипольдері, саңылаулы антенналар және жүргіш толқын антенналары жасалады. Патчтың өзі де тікбұрышты, дөңгелек, үшбұрышты немесе сақиналы пішінде болуы мүмкін. Тәжірибеде тікбұрышты және дөңгелек патчтар жиі таңдалады, өйткені олардың сипаттамалары аналитикалық өрнектермен жеткілікті дәл есептеледі, сәулелену диаграммасы симметриялы, ал бірнеше патчты торға біріктіру қиын емес [4, 9].

3-тараудағы екі элементті сызықтық антенна торында да, 4-тараудағы Яги–Уда антеннасында да сәулелендіргіш ретінде тікбұрышты патч қолданылды. Матаны тоқылу бағыты бойымен түзу кесуге болатындықтан, тікбұрышты элементтің жиектері дөңгелек элементке қарағанда аз сөгіледі.

Біріншіден, тікбұрышты патч ұзындығы $L$ резонанстық жиілікті және ені $W$ кіріс кедергісі мен өткізу жолағын реттейтін екі негізгі параметрлер арқылы сипатталады. Бұл бір-бірінене тәуелсіз екі параметрлерді белгілі бір деңгейде өзгертіп отыруға болады. Сондықтан тікбұрышты патч дөңгелек патчқа қарағанда сәйкестендіру және оңтайландыруға көбірек мүмкіндік береді.

Салыстырмалы түрде алып қарасақ, дөңгелек патчта негізгі геометриялық параметр тек бір радиус болып табылады және оның өзгеруі резонанстық жиілікке де, кіріс кедергісіне де бірдей әсер етеді.

Екіншіден, тікбұрышты патчтың бастапқы өлшемдерін белгілі аналитикалық тәуелділіктер арқылы анықтауға болады. Бұл үшін микрожолақты антенналарды есептеуде кеңінен қолданылатын сынақтан өткен модельдер пайдаланылады. Алынған бастапқы геометриялық параметрлер кейін 2-тарауда сипатталған әдістеме бойынша электродинамикалық оңтайландыру барысында нақтыланады [9, 18, 28].

Үшіншіден, тікбұрышты элементтің түзу жиектерін текстильді төсеніштің негіз және арқау жіптерінің бағыттарына сәйкес түзу кесу арқылы қалыптастыруға болады. Мұндай тәсіл геометриялық өлшемдерді дәл сақтауға мүмкіндік береді. Сонымен бірге қисықсызықты контурларды дайындау кезінде туындауы мүмкін текстильді материал жиектерінің сөгілу қаупі азаяды. Түзу жиек ойық арқылы қоректендірілетін (inset-fed) микрожолақты желіні тікелей жалғауды да жеңілдетеді. Осы ерекшеліктер тікбұрышты патчты екі элементті антенна торы мен Яги–Уда антеннасындағы негізгі сәулелендіргіш элемент ретінде таңдауға негіз болды.

Микрожолақты антенналарды дайындау қарапайым болғандықтан, олар мобильді және спутниктік байланыста, GPS навигациясында, радиожиілікті сәйкестендіруде (RFID), радиолокацияда, WiMAX кең жолақты қолжетімділік желілерінде, ректенналарда және телемедицинада кеңінен қолданылады [29]. Құрылғылар кішірейген сайын көлемді антенналарды арзан материалдан жасалған, соққы мен дірілге төзімді жазық конструкциялар ығыстыра бастады [30].

Заттар интернетіне (IoT) жүздеген құрылғы қосылуы мүмкін, олардың көпшілігі батареямен ұзақ уақыт жұмыс істейді. Мұндай құрылғының антеннасы шағын әрі корпусқа кіріктірілетін болуы керек және энергияны аз жұмсауы тиіс; микрожолақты антенна осы талаптарға жауап береді. IoT-тің денеге орнатылатын құрылғыларды біріктіретін тармағы сымсыз денелік желілер (Wireless Body Area Networks, WBAN) деп аталады. Мұндай желіде физиологиялық параметрлерді тіркейтін сенсорлар адам денесінде немесе оған жақын орналасады. Сенсорлар деректерді орталық құрылғыға жібереді, ал ол деректерді сыртқы желі арқылы медициналық немесе басқа ақпараттық жүйеге өткізеді [31]. WBAN денсаулықты бақылауда, спортшылардың көрсеткіштерін тіркеуде, ойын-сауық жүйелерінде және төтенше жағдайларда жедел әрекет етуде қолданылады [32].




2 сурет – Сымсыз денелік желі (WBAN) сұлбасы [32]

Микрожолақты антенналарды пайдалану телемедицинамен ғана шектелмейді. Олар спортшылардың дене белсенділігін бақылау, жаппай мониторингілеу жүйелері және төтенше жағдайлар кезіндегі сымсыз байланыс міндеттерінде де қолданылады. Осы бағыттардың дамуы текстильді және икемді антенналарға деген зерттеу қызығушылығының артуына ықпал етті [5].

Микрожолақты антеннаның негізгі конфигурациясы бірнеше қабаттан тұрады. Оның құрамында диэлектрлік негізге орналастырылған металл сәулелендіргіш элемент және жерге тұйықтау қабаты болады. Осындай құрылым ықшам форм-факторлы антенналардың әртүрлі нұсқаларын жүзеге асыруға мүмкіндік береді [10]. IoT-қосымшаларында пайдаланылатын көпқабатты микрожолақты антенналарға арналған әдеби шолу автордың [33] еңбегінде берілген.

IoT жүйелерінде қолданылатын байланыс стандарттары кең жиілік ауқымын қамтиды. Олардың төменгі бөлігінде LoRa және Sigfox сияқты энергия тиімділігі жоғары алыс қашықтықтағы байланыс технологияларына арналған субгигагерцтік диапазондар орналасқан. Қысқа қашықтықтағы байланыс жүйелерінде микротолқынды жиілік диапазондары пайдаланылады.

Олардың ішінде 2,4 ГГц өнеркәсіптік, ғылыми және медициналық (ISM) диапазоны кең таралған. Бұл жиілік ауқымы Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee және Z-Wave сияқты сымсыз технологияларда қолданылады. Сымсыз денелік желілерге арналған кейбір технологиялар да 2,4 ГГц диапазонында немесе оған жақын жиіліктерде жұмыс істейді. IoT саласында пайдаланылатын негізгі технологиялар, олардың жиілік диапазондары және қолданылу бағыттары бойынша жинақталған мәліметтер 1-кестеде келтірілген [34].

1 кесте – IoT жүйелерінде жиілік диапазондарының қолданылуы [34]

| Қолданылу саласы | Технология | Жиілік диапазоны |
|---|---|---|
| Ақылды үйлер | Wi-Fi | 2,4 ГГц |
| | Bluetooth | 2,4 ГГц |
| | GPS | 1575,42 МГц; 1227,6 МГц; 1176,45 МГц |
| | Zigbee | 917 МГц; 2,4 ГГц |
| | Z-Wave | 2,4 ГГц |
| Медицина | MBAN/WBAN (IEEE 802.15.6) | 400/800/900 МГц; 2,36 ГГц; 2,4 ГГц |
| Ақылды ауыл шаруашылығы, ақылды қалалар | LoRa | 433/868/915 МГц |
| | Sigfox | 868/902 МГц |

Жұмыс жиілігі ретінде 2,45 ГГц таңдалды. Бұл жиілікте бос кеңістіктегі толқын ұзындығы шамамен 122 мм, сондықтан $\varepsilon_r \approx 1{,}5$ болатын текстильді төсеніштегі жарты толқынды патчтың ұзындығы 50 мм шамасында болады, бұл киімге орналастыруға жарайды. 915 МГц жиілікте антенна шамамен екі жарым есе үлкен болар еді, ал 5,8 ГГц жиілікте ол кішірейгенімен, дене тіндеріндегі шығын артады. Әдебиетте сипатталған киетін антенналардың көбі 2,4–2,5 ГГц диапазонына $S_{11} \leq -10$ dB шарты бойынша жобаланған [35]. Бұл диапазон лицензиясыз ISM жолағына жатады және оны Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee модульдері пайдаланады, сондықтан антеннаны дайын IoT-құрылғыларымен бірге қолдануға болады.

Микрожолақты антенналардың IoT құрылғыларына қатысты міндеттерінің кең ауқымында қолдану мүмкіншіліктері зерттелді. Мобильді байланыс жүйелерінде олардың ықшамдылығы мен дайындау құнының төмендігі портативті және кіріктірілген құрылғылармен біріктіріп жұмыс жасауын жеңілдетеді [36]. Спутниктік навигация жүйелерінде (GPS) микрожолақты антенналар позициялаудың талап етілетін дәлдігін қамтамасыз ету үшін диэлектрлік өтімділігі жоғары төсеніштермен бірге қолданылады [37]. Радиожиіліктік сәйкестендіру жүйелерінде микрожолақты конструкциялар логистика, көлік, денсаулық сақтау және өнеркәсіптік автоматтандыру міндеттерін шешу үшін кең жиілік диапазонында пайдаланылады [10].

Кең жолақты сымсыз байланыс жүйелері (WiMAX) микрожолақты антенналардың қолданудағы тағы да бір маңызды салаларының бірі болып табылады, сондықтан микрожолақты патч-антенналар IEEE 802.16 стандартына сәйкес бірнеше резонанстық жиілікте жұмыс істеуге жобаланады [38]; Ықшам антенналар қажет болған жерде микрожолақты конструкциялар жақын қашықтықтағы радарларда және автомобиль радиолокациясында қолданыла бастады [39]. Оларды ректенналарда да пайдаланады. Ректенна қабылданған микротолқынды қуатты тұрақты токқа түрлендіреді, ал энергияны тиімді жинау үшін оған бағыттылығы жоғары антенна қажет [35].

Биомедицинада 2,45 ГГц жиілікте жұмыс істейтін микрожолақты антенналар телемедицина мен денсаулық жағдайын қашықтан бақылау жүйелері үшін зерттеліп жүр [29, 40]. Бұл ретте адам ағзасына электромагниттік әсерді барынша азайтатын жоғары күшейту коэффициентіне және алға/артқа бағытталған сәулелену қатынасының жоғары мәніне ие конструкцияларға басымдық беріледі [40]. Микрожолақты патч-антенналар микротолқынды гипертермиялық терапия міндеттеріне қатысты да қарастырылған, мұнда жеңіл сәулелендіргіш элементті қолдану ағза тіндеріне тиімді терапиялық әсер етуге мүмкіндік береді [41].

Әдебиеттерде келтірілген жіктеуге сәйкес IoT-құрылғылар келесі салаларда қолданылады: медицина (инсульттен кейінгі оңалту, неврологиялық ауруларды диагностикалау, электрокардиография, ауруларды болжау, симптомдарды талдау), спорт (спортшымен жаттығу барысында температураны, ылғалдылықты, жарықтануды және қысымды мониторингілеу), денсаулық сақтау (құлауды болжау және анықтау, жүрек ырғағын тіркеу, тыныс алуды мониторингілеу) және қауіпсіздік (қоршаған ортаны мониторингілеу, әлеуметтік қауіпсіздік, транзакциялар қауіпсіздігі); конструкциялық форм-факторы бойынша: білезік, бас киімге орнатылатын модуль, жилет, көзілдірік, теріге жапсырылатын патч, қолға белдік [11]. Микрожолақты антенналардың қолдану аясының кеңдігін 3-суреттегі сұлбадан байқауға болады. Қолданылу салалары мен форм-факторлардың мұндай алуан түрлілігі антенналық жүйеге қайшылықты талаптар қояды. Демек тасымалдаушының материалы мен геометриясына қарамастан электродинамикалық сипаттамалардың тұрақтылығын қамтамасыз ете отырып, конструкцияның ықшамдылығы мен төмен профильділігін сақтау қажет.




3 сурет – IoT жүйелеріндегі микрожолақты патч-антенналардың қолданылу салалары [11]

Антенналарға деген қызығушылықтың артуы денсаулық жағдайын бақылау және дене белсенділігін мониторингілеу жүйелерінің дамуымен тығыз

байланысты: денсаулық сақтау саласында смартфондар мен құрылғыларды қолдану [42] еңбегінде жүйелендірілген болса, медициналық құрылғыларға шолу [43] еңбегінде ұсынылған. Мұндай жүйелер, әдетте, сымсыз денелік желілер (WBAN) негізінде құрылады, олар үшін адам денесіне жақын орналасқан жағдайда сигналдың тұрақты таралуы аса маңызды. Осындай тұрақты таралудың аурухана жағдайындағы ерекшеліктерінің зерттелуі [44] еңбегінде көрсетілген. Антеннаны денеге орналастырған кезде оның сипаттамалары адам тіндерінің әсерінен бұзылуға ұшырайды: патч-антенналардың сипаттамаларының бұзылу әсерлері [45] еңбегінде егжей-тегжейлі қарастырылған. Механикалық икемді антенналарды жобалау, талдау және қолдану бойынша жинақтаулы шолулар [46], [47] және [48] еңбектерінде келтірілген. Оларда материалдарды, топологияларды және деформацияларға төзімділікті арттыру әдістерін таңдау тәсілдері жүйеленіп жазылған.

2,45 ГГц ISM диапазонында IoT құрылғыларымен қолдануға арналған микрожолақты антенналардың бірқатар нақты конструкциялары ұсынылған. Оларға радиожиіліктік энергияны жинауға арналған антенна [49], RFID-қосымшаларына арналған микрожолақты патч-антенналар торы [50] және BLE мен LoRa технологияларына арналған толықтай текстильді екі диапазонды антенналарды [51] жатқызуға болады. Денеден тыс байланыс кезінде күшейтуді арттыру үшін текстильді антенна торлары пайдаланылады, мұндай жоғары күшейтілген жүйенің мысалы [21] еңбегінде келтірілген. Жоғары жиілікті тарату желілерін наноөлшемді элементтермен сәйкестендіру және кіріктіру мәселелері [52] еңбегінде, ал копланарлық тарату желісінің өзін-өзі ауыстырып қосатын наноқұрылғылармен кіріктірілуіне қатысты жоғары жиіліктегі сипаттамалары [53] еңбегінде қарастырылған. Бір және көп диапазонды микротолқынды қолданбаларға арналған метаматериалдық жұтқыш құрылымдар [54] еңбегінде зерттелген. Келтірілген жұмыстар IoT-қа арналған антенналардың зерттеу аясының кеңдігін растай отырып, осы диссертацияның зерттеу бағытын, яғни меншікті жұтылу коэффициенті төмен қарапайым бір қабатты текстильді конструкцияларын айқындайды.

Антенналардың дамуы Заттар интернеті тұжырымдамасымен тығыз байланысты: IoT-құрылғыларына, олардың қолданылу салаларына және шешілмеген мәселелеріне кең шолу [3] еңбегінде келтірілген. Антенналардың өзіне арналған талаптарды, топологияларды және кіріктіру әдістерін талдайтын жүйелендіруші шолулар [12] және [55] еңбектерінде ұсынылған. Сымсыз денелік желілерді (WBAN) енгізудің технологиялық және экономикалық аспектілері [56] шолуында, ал денеге сымсыз байланысқа арналған текстильді антенналарды жүйелеу [57] еңбегінде қарастырылған.

Дайындау технологиялық процесінің қарапайымдылығы, бағасы төмен материалдарды қолдану мүмкіндігі және механикалық тұрақтылығының арқасында микрожолақты патч-антенналар жоғары бағаланады. Құрылғылар кішірейіп, бір корпусқа көбірек функция сыйғызылған сайын микрожолақты патч-антенналар көлемді антенналардың орнына жиі қолданылады.

Патч-антеннаның шектеулері де бар. Оның өткізу жолағы тар, радиациялық тиімділігі төмен, төсеніште беттік толқындар пайда болады және

ол үлкен қуатта жұмыс істеуге жарамайды [10, 18]. Сонымен бірге оның сипаттамалары антеннаның иілуіне және айналасындағы ортаның диэлектрлік қасиеттеріне байланысты өзгереді.

Киетін IoT-құрылғыларында бұл сезімталдық айқынырақ байқалады. Киімдегі антенна дене қозғалғанда иіледі, ал адам денесінің тіндері диэлектрлік өтімділігі жоғары және шығыны көп орта болғандықтан, резонанстық жиілікті ығыстырып, сәулеленген энергияның бір бөлігін жұтады. Антенна мұндай жағдайда тұрақты жұмыс істеуі үшін төсеніш пен өткізгіштің материалын дұрыс таңдау керек, сондықтан киетін антенналарда икемді текстильді материалдар көбірек қолданылып жүр [48, 58].

## 1.2 Текстильді материалдар мен оларды дайындау технологиялары бойынша ғылыми әдебиеттерге шолу

2000 жылдардың басынан бастап киетін антенналарға арналған жарияланымдар саны өсе бастады. Бұған икемді, жеңіл және дене пішініне сәйкес келетін (конформды) сымсыз құрылғыларға сұраныстың артуы себеп болды [12, 59]. Қатты диэлектрлік төсеніштерді мұндай құрылғыларға кіріктіру қиын болғандықтан, төсеніш пен өткізгіш қабат үшін балама материалдар ізделіп, олардың ішінде текстиль жиі қолданыла бастады. Икемді микрожолақты патч-антенналардың конструкциялары мен материалдарына жүйелі шолу [58] жұмыста берілген. Шолуға енген антенналардың шамамен 70 %-ы тікбұрышты патч түрінде орындалған, ал жұмыстардың 58 %-дан астамы 2,4–2,5 ГГц диапазонына арналған. Осы диссертацияда таңдалған тікбұрышты топология мен 2,45 ГГц жиілік осы саладағы жұмыстардың басым бөлігіне сәйкес келеді. [58] шолуда мыс өткізгіш қабаттар электродинамикалық сипаттамалары бойынша ең тиімді материалдардың қатарына жатқызылады, бірақ олардың иілгіштігі шектеулі. Графен, PEDOT, полианилин сияқты өткізгіш полимерлер мен ток өткізгіш маталар икемдірек, алайда олардан жасалған антенналардың күшейту коэффициенті мен сәйкестендіру сипаттамалары мыс өткізгіштікінен төмен. Осы себепті бұл жұмыста өткізгіш қабат ретінде мыс таспа да, ток өткізгіш мата да зерттелді.

Өткізгіш қабатты текстильге тікелей басып шығару әдістері де қолданылады. [60] жұмыста 2,45 ГГц диапазонына арналған текстильді ректенналар трафареттік басу (screen-printing) және ракельмен жағу (doctor blade) әдістерімен дайындалып, төсеніштің кеуектілігі, бояудың адгезиясы, механикалық деформация мен бет кедір-бұдырлығының шығындарға әсері бағаланған. Авторлардың деректері бойынша текстильді тарату желілеріндегі шығынның негізгі бөлігі өткізгіштегі шығынға тиесілі, өйткені Sintex 3D097 төсенішінің диэлектрлік шығыны ($tg\ \delta \approx 0{,}001$) FR-4 материалынікінен ($tg\ \delta \approx 0{,}03$) шамамен 30 есе аз. Шығын деңгейі өткізгіш бояудың құрамына және оны қатайту температурасына да тәуелді болған, бұл жоғары температураға төзімсіз маталарды қолдануды шектейді.

Киімге кіріктірілген антенналардың ерте мысалдарының бірі GSM 900 МГц және Bluetooth 2,4 ГГц диапазондарына арналған икемді инверсияланған F-

антенна (PIFA) болды [61]. Төменгі диапазонда оның тиімділігі аз болғанымен, 2,4 ГГц жиілікте адам денесіне жақын орналасқанда антенна жұмыс қабілетін сақтаған [59]. Салонен мен Хурме WLAN жүйесіне арналған патч-антеннаның төсенішін арзан флис матадан, ал сәулелендіргіш пен жерге тұйықтау қабатын тоқылған мыс матадан жасаған [62]. Авторлар оны спорттық киім мен құтқарушылар формасына арналған алғашқы шағын текстильді антенналардың бірі деп есептейді; өлшеу нәтижелері модельдеумен жақсы сәйкес келген. Келесі жұмыста [15] сол топ дөңгелек поляризациялы микрожолақты GPS антенналары үшін бес синтетикалық матаны салыстырған. Маталардың салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі құрамы мен құрылымына қарай 1,1–1,7 аралығында болған. Флис, фетр және Cordura төсеніш ретінде жарамды деп танылған, ал Cordura біртекті құрылымы мен серпімділігінің арқасында деформация кезінде антенна геометриясын басқаларынан жақсы сақтаған. Осы диссертация үшін екі жұмыстың маңызы бар: [62] флис төсеніштің 2,4 ГГц диапазонында жарамдылығын көрсетсе, [15] бір конструкцияда мата түрін ауыстыру арқылы материалдың әсерін салыстыру тәсілін ұсынады, ал 3-тараудағы зерттеу осы тәсілге жақын.

2,45 ГГц ISM диапазонындағы дербес (PAN) және денелік (WBAN) желілерге арналған антенналар [63] жұмыста зерттелген. Shieldit және FlecTron ток өткізгіш маталарынан жасалып, арамид негізіндегі қорғаныш киіміне кіріктірілген антенналар иілгеннен кейін де жұмыс қабілетін сақтаған, ал адам денесіне жақын орналасқанда олардың тиімділігі жоғары болған.

Ток өткізгіш маталардың бірнеше түрі [64] жұмыста салыстырылған: никельмен қапталған тоқылған мата, күміспен қапталған трикотаж және күміс-мыс-никель жабыны бар мата.

Беттік кедергісі біркелкі тоқылған маталар антенна геометриясын тұрақты сақтаған. Фетр мен полиамидті аралық мата сияқты шығыны аз төсеніштермен бірге қолданылған мұндай антенналар Bluetooth талаптарын қанағаттандырған, бірақ иілгенде олардың поляризация тазалығы төмендеген.

Басқа геометриялар да зерттелген. Мыс жабыны бар матадан жасалып, диэлектрлік өтімділігі төмен флис төсенішке орналастырылған дөңгелек поляризациялы сақиналы антенналардың өткізу жолағы 190 МГц-тен асқан [65, 66]. Чжу мен Лэнгли [67] 2,45 және 5 ГГц диапазондарында жұмыс істейтін қос жолақты копланарлы патч-антеннаны кең таралған киім маталарынан жасап, оны EBG төсенішімен біріктірген. Төсеніш ретінде қалыңдығы 1,1 мм, $\varepsilon_r = 1{,}38$, $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}02$ болатын фетр алынған. Небәрі 3×3 элементтен тұратын EBG торы денеге қарай сәулеленуді 10 dB-ден астам азайтып, күшейту коэффициентін 3 dB-ге арттырған. Алайда EBG қабаты антеннаның ауданы мен қалыңдығын ұлғайтады (EBG торының өлшемі 120×120 мм), ал осы диссертациядағы антенналар бір текстильді төсеніш қабатында орындалған.

Антеннаны киімге тікелей кіріктіру үшін ток өткізгіш жіптер, бояулар, сиялар мен таспалар пайдаланылып, олардан дипольді, көбелек тәрізді және спиральды антенналар жасалған [68]. Кестеленген конструкцияларда кедергілік шығын жоғары болған, ал ток өткізгіш нейлон мен мыс маталары өткізгіштік пен пайдалану мерзімі тұрғысынан жақсы нәтиже көрсеткен.

Трафареттік басу әдісімен дайындалған, апертуралық байланысы бар толық текстильді патч-антенна [19] жұмыста ұсынылып, оның тиімділігі мен жууға төзімділігі зерттелген.

Ван және әріптестері [20] полимер-керамикалық композит төсеніштерге E-fiber металл-полимер талшықтарын автоматты түрде кестелеп, конформды антенналар жасаған. Талшықтың өзегі берік әрі иілгіш полимерден, сыртқы қабаты металдан тұрады. Таспалы құю әдісімен алынған PDMS және сирек жер элементі титанатының композиті диэлектрлік өтімділікті 3-тен 12-ге дейін реттеуге мүмкіндік берген. Дайындалған беріліс желілері, патч-антенналар мен антенна торлары мыстан жасалған аналогтарымен салыстырылған. Бұл жұмыс кестелеуді матадан басқа иілгіш полимер төсеніштерде де қолдануға болатынын көрсетеді. Дирк және әріптестері [69] белсенді текстильді антенналарды электрондық схемамен бірлесіп жобалау (co-design) стратегияларын екі мысалмен талдаған. Бірінші мысалда 2,45 ГГц ISM антеннасы аз шуылды күшейткішке тікелей қосылып, антенна импедансы шуыл бойынша оңтайлы болатындай таңдалған. Екінші мысалда 50 Ом гибридті тармақтағышы бар, апертура арқылы қоректенетін GPS антеннасы күшейткішке сәйкестендіру тізбегі арқылы қосылған. Осы диссертацияда антенналар 50 Ом-ға сәйкестендірілген пассивті құрылым ретінде жобаланды; co-design тәсілі оларды IoT-модульмен біріктіру кезеңінде пайдалы болуы мүмкін.

Микрожолақты антенналардың теориялық негіздері [70] жұмыста қаланып, кейін [71] монографияда жүйеленген. Матаны адам денесімен әрекеттесетін антенналардың төсеніші ретінде пайдалану мүмкіндігі [72, 73] жұмыстарда тәжірибе жүзінде тексерілген.

Кестеленген антенналардың дәлдігін арттыру мәселесі [74] жұмыста қарастырылған. Диаметрі шамамен 0,12 мм болатын жеті талшықты Elektrisola E-жіптерін және жаңа кестелеу процесін қолдана отырып, авторлар текстильде 0,1 мм-ге дейінгі геометриялық дәлдікке, яғни баспа платасы прототиптерінің деңгейіне жеткен. Олардың алдыңғы әдісімен салыстырғанда дәлдік 3 есе артып, құны 24 есе азайған, дайындау уақыты екі есе қысқарған, ал радиожиілік сипаттамалары нашарламаған. Тәсіл 1–5 ГГц диапазонында жұмыс істейтін текстильді спиральды антеннамен тексерілген. Антеннаны электрондық модульмен біріктірудің жалпы мәселелері текстильден тыс салада да зерттелген. Бребельс және әріптестері [75] антеннаны корпус деңгейінде біріктіру (system-on-package, SOP) және радиожиілік схемасымен бірлесіп жобалау тәсілін қарастырып, антенна мен РЖ тізбектері арасындағы паразиттік байланысты болдырмайтын ұсыныстар берген, сондай-ақ микротолқынды және миллиметрлік диапазондағы шағын антеннаны чипте және корпуста орналастыру нұсқаларын салыстырған. Киетін құрылғыда антенна да IoT-модульдің жанында орналасатындықтан, мұндай паразиттік байланысты ескеру қажет. Мурали және әріптестері [16] медициналық киетін құрылғыларға арналған тікбұрышты микрожолақты патч-антеннаны диэлектрлік өтімділігі әртүрлі мақта маталарында жасап, коаксиалды қоректендіру арқылы олардың шағылу коэффициентін, күшейту коэффициентін және сәулелену сипаттамаларын салыстырған. Бұл жұмыс мақта матаны төсеніш ретінде

қолдануға болатынын көрсетеді; осы диссертацияда мақта мата Яги–Уда антеннасының төсеніштерінің бірі ретінде алынған, ал қоректендіру коаксиалды зондпен емес, микрожолақты желімен жүзеге асырылған.

Әдебиеттерде келтірілген текстильді материалдардың диэлектрлік қасиеттері мен өткізгіштігі 2-кестеде жинақталған.

2 кесте – Ғылыми деректер бойынша антенналарда қолданылатын текстильді материалдар

| Жиілік жолағы | Негіз | $\varepsilon_r$ | tg $\delta$ | Өткізгіш | Нәтиже | Дереккөз |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GSM 900 МГц / BT 2,4 ГГц | көрсетілмеген, 0,236 мм | 3,29 | 0,0004 | көрсетілмеген | қанағаттанарлық | [61] |
| WLAN 2,4 ГГц | флис, 3,0 мм | 1,04 | көрсетілмеген | тоқылған мыс мата | қанағаттанарлық | [62] |
| GPS 1,5 ГГц | Cordura, 0,5 мм | 1,1-1,7 | көрсетілмеген | мыс фольгасы | жақсы | [15] |
| ISM 2,4 ГГц / GPS 1,5 ГГц | флис, 2,56 мм | 1,25 | көрсетілмеген | Flectron | орташа | [63] |
| ISM 900 МГц | полиуретан. көбік, 11,0 мм | 1,16 | 0,01 | Flectron | қанағаттанарлық | [65] |
| WLAN 2,4/5,8 ГГц | фетр, 1,1 мм | 1,30 | 0,02 | Zelt матасы | қанағаттанарлық | [68] |
| ISM 2,4 ГГц | мақта мата/полиэстер, 2,808 мм | 1,6 | 0,02 | Flectron / ток. сия | қанағаттанарлық | [19] |
| Жалпы, 2–2,4 ГГц | PDMS | 3,0-13 | 0,02 | электрөткізгіш талшықтармен тігілген | жақсы | [20] |
| BT 2,4 ГГц | полиамидті аралық төсеніш, 6,0 мм | 1,14 | өте төмен | Ag–Cu–Ni матасы | жақсы | [64] |
| BT 2,4 ГГц | фетр, 3,5 мм | 1,45 | 0,02 | Ag–Cu–Ni матасы | жақсы | [64] |

Текстильді антеннаның сипаттамалары материалға ғана емес, дайындау технологиясына да тәуелді. Шыны немесе FR-4 төсеніштерінен айырмашылығы,

матаның қалыңдығы мен текстурасы біркелкі емес, әрі ол оңай деформацияланады. Өткізгіш қабатты, текстильді төсенішті және жерге тұйықтау қабатын біріктіру тәсілі антенна параметрлеріне, әсіресе кіріс импедансының тұрақтылығына тікелей ықпал етеді: аса жоғары жиілік диапазонында сәулелендіргіш өлшемінің оннан бір миллиметрге өзгеруі резонанстық жиілікті ығыстыруы мүмкін [76]. Қабаттарды көбіне желімдік пленкалармен немесе термобелсенді байланыстырғыш материалдармен біріктіреді, олар қабаттардың біркелкі жанасуын қамтамасыз етеді [63, 64, 76]. Желімдеудің де кемшіліктері бар. Желім қабаты қалыңдаған сайын қосымша диэлектрлік шығын пайда болады [77]; сұйық желімді біркелкі жағу қиын, ал оның артық мөлшері конструкцияда қосымша диэлектрлік немесе өткізгіш қабат түзеді [64]. Байланысты берік ету үшін желім үтікпен немесе термопреспен қыздырылады, алайда жоғары температура мен ылғал металдандырылған маталардың тотығуын жеделдетеді. Ұзақ пайдаланғанда осының салдарынан беттік кедергі өсіп, антенна тиімділігі төмендейді [78]. Желімнің баламасы – өткізгіш элементтерді төсенішке тігу немесе кестелеу. Тігілген конструкция иілгіштігін сақтайды [76], бірақ ине өткізгіш талшықтарды зақымдап, өткізгіш жолдың тұтастығын бұзуы мүмкін, ал мұндай ақау сәулелену диаграммасының өзгеруіне немесе жергілікті қысқа тұйықталуға әкеледі [64]. Сол үшін практикада екі әдіс жиі бірге қолданылады [76, 77].

Матаның қасиеттеріне талшықтардың орналасуы мен тоқылу құрылымы да әсер етеді. Мата анизотропты: оның диэлектрлік шығыны мен ішіндегі өрістің таралуы бағытқа тәуелді. Демек, қабаттардың бір-біріне қатысты бағдары да антенна сипаттамаларын өзгертеді [79, 80].

Қажетті қалыңдық көбіне жұқа матаның бірнеше қабатын жинау арқылы алынады, ал қабаттар арасында ауа саңылаулары мен біртекті емес аймақтар қалуы мүмкін [79]. Қоректендіру коннекторын бекіту де оңай емес, себебі маталардың көпшілігіне дәстүрлі дәнекерлеу жарамайды. Түйіспелер электрөткізгіш желіммен жасалады және олар циклдік механикалық жүктемеге төзуі керек [63, 68].

Автор бірлесіп жазған жүйелі шолудың [11] қорытындысы бойынша текстильді материалды антеннада қолданғанда оның физикалық және электромагниттік ерекшеліктерін қатар ескеру қажет. Барлық жағдайға бірдей жарайтын мата жоқ: таңдау электромагниттік параметрлер, иілгіштік, ұзақ пайдаланудағы тұрақтылық пен киюге ыңғайлылық арасындағы ымыраға негізделеді.

### 1.3 Зерттеуде пайдаланылған текстильді материалдар мен өткізгіштердің электрофизикалық қасиеттері

Зерттеуге киім өндірісінде кең қолданылатын, сатып алу оңай текстильді материалдар мен прототип дайындауға жарайтын екі өткізгіш материал таңдалды. Екі элементті сызықтық антенна торы фетр, джинс матасы және полиэстер төсеніштерінде жасалды, өткізгіш қабат ретінде мыс таспа мен ток өткізгіш мата алынды. Осы материалдардың электрофизикалық параметрлері

[81] жұмыста сақиналы резонатор (SRR) әдісімен өлшенген; 3-кестеде келтірілген мәндер электродинамикалық модельдеудің бастапқы деректері болды.

3 кесте – Екі элементті сызықтық антенна торында қолданылған материалдардың электрофизикалық қасиеттері [81]

| Материал | $\varepsilon_r$ | tg $\delta$ | $\sigma$, См/м | $h$, мм |
|---|---|---|---|---|
| Фетр (негіз) | 1,45 | 0,04 | – | 2,0 |
| Джинс мата (негіз) | 1,6 | 0,05 | – | 2,0 |
| Полиэстер (негіз) | 1,9 | 0,02 | – | 0,48 |
| Мыс таспасы (өткізгіш) | – | – | $5{,}8\cdot10^{7}$ | 0,05 |
| Ток өткізгіш мата (өткізгіш) | – | – | $2{,}9\cdot10^{4}$ | 0,1 |

3-кестеден көрінетіндей, пайдаланылған текстильді төсеніштердің диэлектрлік өтімділігі ($\varepsilon_r$=*1,45–1,9*) дәстүрлі микрожолақты антенна төсеніштеріне тән $2{,}2 \le \varepsilon_r \le 12$ аралығынан төмен. $\varepsilon_r$ аз болғанда патчтың шеткі өрістері кеңістікке оңай шығады, соның арқасында басқа параметрлер бірдей болса, өткізу жолағы кеңейеді. Модельдеуде ток өткізгіш мата тұтас металл түрінде емес, қалыңдығы 0,1 мм, өлшенген беттік кедергісі 0,34 Ом/шаршы қабат түрінде берілді; бұл $\sigma \approx 2{,}9\cdot10^{4}$ См/м тиімді өткізгіштікке сәйкес келеді [81]. Мұндай модель тоқылған материалдағы резистивтік шығынды ескереді, ал жеке талшықтарды модельдеудің қажеті болмағандықтан, есептеу торын ірілетуге болады.

Микрожолақты Яги–Уда антеннасының төсеніші ретінде мақта мата, джинс матасы және 100 % полиэстер алынды. Белсенді элемент, директорлар мен рефлектор күмістен, жерге тұйықтау қабаты мыстан жасалды. Төсеніштердің параметрлері [82] жұмыстан алынды: мақта мата үшін $\varepsilon_r = 1{,}45$, $tg\delta = 0{,}04$; джинс матасы үшін $\varepsilon_r = 1{,}6$, $tg\delta = 0{,}05$; полиэстер үшін $\varepsilon_r = 1{,}9$, $tg\delta = 0{,}02$. Джинс матасы мен полиэстердің мәндері 3-кестедегі мәндермен сәйкес келеді, сондықтан 5-тарауда екі антенна осы төсеніштер бойынша бірдей материалдық параметрлермен салыстырылады. Төсеніш қалыңдығы әр конструкция үшін CST Studio Suite бағдарламасындағы параметрлік оңтайландыру нәтижесінде таңдалды.

Текстильді материалдарды антенна төсеніші ретінде пайдалану дәстүрлі қатты төсеніштермен салыстырғанда бірқатар ерекшеліктерге ие. Біріншіден, мата біртекті диэлектрик емес: ол жіптерден тоқылған немесе басылған кеуекті құрылым болып табылады, ал жіптердің арасындағы кеңістікті ауа толтырады. Сондықтан матаның тиімді диэлектрлік өтімділігі жіп материалының өз өтімділігінен төмен болады және тоқыма тығыздығына, жіп жуандығына, матаның қысылу дәрежесіне тәуелді. Осы себепті бірдей атаумен сатылатын, бірақ әртүрлі өндірушілер шығарған маталардың параметрлері бір-бірінен ерекшеленуі мүмкін.

Екіншіден, текстильді материалдар анизотропты болуы мүмкін: негіз және арқау жіптері бағыттарында матаның құрылымы әртүрлі, сондықтан

электрофизикалық қасиеттер де бағытқа байланысты аздап өзгеруі ықтимал. Осы жұмыста маталар модельдеуде біртекті және изотропты диэлектрик ретінде қарастырылды. Бұл жуықтау антенна сипаттамаларын бағалау үшін жеткілікті дәлдік береді, алайда модельдеу мен өлшеу нәтижелері арасындағы шамалы айырмашылықтардың бір себебі болуы мүмкін.

Үшіншіден, маталар ылғалды сіңіреді. Судың диэлектрлік өтімділігі ауаға қарағанда әлдеқайда жоғары болғандықтан, ылғал мөлшерінің артуы төсеніштің тиімді өтімділігі мен шығындарын арттырады, ал бұл резонанстық жиіліктің ығысуына және тиімділіктің төмендеуіне әкеледі. Осы зерттеудегі өлшеулер зертханалық жағдайда, құрғақ маталармен жүргізілді, сондықтан ылғалдылықтың әсері жеке қарастырылмады.

Төртіншіден, матаның қалыңдығы тұрақты шама емес. Фетр және джинс сияқты қалың маталар қысым түскенде жұқарады, ал бұл антеннаның резонанстық жиілігі мен өткізу жолағына тікелей әсер етеді. Сондықтан прототиптерді дайындау кезінде матаны қатты қыспау және өлшеу кезінде антеннаны бірдей жағдайда орналастыру маңызды.

Өткізгіш материалдарды таңдау кезінде олардың электрлік қасиеттерімен қатар механикалық қасиеттері де ескерілді. Мыс таспаның өткізгіштігі жоғары ($5{,}8 \cdot 10^7$ См/м) және оны матаға жабыстыру оңай, бірақ ол қайталанған иілу кезінде мыжылып, сынуы немесе матадан ажырап кетуі мүмкін. Ток өткізгіш матаның өткізгіштігі төменірек ($2{,}9 \cdot 10^4$ См/м), алайда ол төсенішпен бірге иіледі, киімге тігуге немесе жапсыруға ыңғайлы және ұзақ пайдалану кезінде пішінін сақтайды. Осылайша, екі өткізгіш материал тек электрлік көрсеткіштері бойынша ғана емес, сонымен қатар тозуға төзімділігі, иілгіштігі және киімге біріктіру тәсілі бойынша да ерекшеленеді. Бұл салыстыру өткізгіш материалын ауыстырғанда антенна сипаттамаларының қалай өзгеретінін тексерудің практикалық маңызын көрсетеді: егер сәулелену сипаттамалары өткізгіш түріне аз тәуелді болса, әзірлеуші иілгіштік пен беріктік тұрғысынан ыңғайлы материалды еркін таңдай алады.

## 1.4 IoT-қа арналған қолданыстағы киетін антенналарға шолу және топологияларды таңдауды негіздеу

Ғылыми деректерге жүргізілген талдаулар осы жұмыста зерттеліп отырған екі элементті сызықтық антенна торы мен Яги–Уда антеннасын таңдауды қазіргі ғылыми еңбектерде ұсынылған IoT-қосымшаларына арналған қолданыстағы киетін антенналармен салыстыру арқылы негіздеуге мүмкіндік береді.

IoT-қосымшаларына арналған антенналар сәулелендіргіштің топологиясына қарай жеке патч-антенналар, монополды және жазық инверсияланған F-антенналар (PIFA), электромагниттік тыйым салынған аралық (EBG) құрылымдары мен жасанды магниттік өткізгіштерге (AMC) негізделген антенналар, сондай-ақ Яги–Уда типті бағытталған антенналар мен антенна торлары бағыттары бойынша дамуда. Аталған бағыттардың барлығы күшейту коэффициенті, габариттік өлшемдер, электромагниттік қауіпсіздік және дайындау күрделілігі арасында белгілі бір ымыраны қамтамасыз етеді.

Антеннаның күшейту коэффициентін жоғарылатудың бірнеше негізгі жолы бар. Оларға антенна торындағы сәулелендіргіш элементтер санын арттыру (1×4, 2×2), АМС немесе EBG типті шағылыстырғыш құрылымдарды пайдалану, металл қуысты резонаторлық конструкцияларды (SIW) қолдану, сондай-ақ Яги–Уда сұлбасына сәйкес пассивті элементтерді орналастыру жатады. Алайда бұл тәсілдердің әрқайсысы киетін антеннаға қойылатын талаптарға толық сай келмейді. Сәулелендіргіш элементтер саны артқан сайын қоректендіру желісі күрделеніп, ұзарады, ал онымен бірге желідегі шығын да өседі. Текстильді төсеніштерде tg $\delta$ = 0,02–0,05 болғандықтан, бұл шығын элементтер санын арттырудан алынатын күшейту коэффициентінің өсімін ішінара жояды. Сонымен қатар апертура үлкейген сайын антеннаны дененің қисық бетіне тығыз орналастыру қиындайды. АМС және EBG құрылымдары күшейту коэффициентін арттырып, меншікті жұтылу коэффициентін төмендетеді, бірақ олар периодты көпқабатты құрылым болғандықтан, антенна қалыңдап, иілгіштігі нашарлайды. Металл қуысты резонаторлық конструкциялар жоғары күшейту коэффициентін береді, алайда оларды дайындау үшін фрезерленген металл негіз бен өтпелі тесіктер қажет, сондықтан оларды толықтай текстильден жасау мүмкін емес [23, 24]. Ал Яги–Уда сұлбасы бойынша пассивті элементтерді қосу қосымша қоректендіру желісі мен өтпелі тесіктерді қажет етпей, активті элементпен бір өткізгіш қабатта антеннаның күшейту коэффициентін арттыруға мүмкіндік береді. Осыған байланысты аталған тәсілдер төменде әдебиеттерде сипатталған нақты конструкциялар мысалында қарастырылады.

Жеке текстильді патч-антенналар конструкциясының қарапайымдылығы және төмен профильділігіне байланысты кеңінен зерттелген. Мысалы, [17] еңбегінде 2,45 ГГц ISM диапазонында жұмыс істеуге арналған джинс негізді икемді патч-антенна ұсынылған. Оның шағылу коэффициенті –41,7 dB, күшейту коэффициенті 2,63 dBi, ал меншікті жұтылу коэффициенті 0,0548 Вт/кг болған және конструкцияның иілуге төзімділігі эксперименттік тұрғыдан расталған. [83] зерттеуінде IoT-қосымшаларына арналған былғары негізді патч-антенна қарастырылып, 2,45 ГГц жиілігінде шамамен 2 dBi күшейту коэффициентіне және 88 % радиациялық тиімділікке қол жеткізген. Сонымен қатар антеннаның шағылу коэффициенті –65 dB деңгейінде болған. WBAN-қосымшаларына арналған 2,4 ГГц ISM диапазонындағы джинс негіздегі тікбұрышты патч-антеннаға иілудің әсері [84] жұмысында егжей-тегжейлі зерттелген. Онда білекке баламалы радиуста иілу кезінде күшейту коэффициентінің 2-4 dB төмендейтіні, жартылай қуат деңгейіндегі негізгі жапырақшаның енінің шамамен 25° артатыны, ал жұмыс жиіліктерінің жолағы іс жүзінде өзгеріссіз қалатыны көрсетілген. Жеке патч-антенналардың ортақ ерекшелігі – салыстырмалы түрде орташа күшейту коэффициенті (әдетте 2-3 dBi), бұл байланыс қашықтығын шектеп, күрделірек топологияларға деген қызығушылықты арттырады.

Бағытталған конструкциялардан басқа, әдебиеттерде әртүрлі IoT міндеттеріне арналған антенналардың басқа да түрлері кеңінен қарастырылған. Аса кең жолақты (UWB) антенналар, оның ішінде иілу кезіндегі конформдық

қасиеттерін бағалау [85, 86] және [87] еңбектерінде қарастырылған; биомедициналық телеметрияға арналған кең жолақты антенна [88] еңбегінде ұсынылса, ықшам дипольді GPS-антенна [89] еңбегінде сипатталған. Биомедициналық қолданбаларға арналған метаматериалдық элементтері бар патч-антенналар [90, 91] жұмыстарда зерттелген. [92] жұмыста көпдиапазонды жазық PIFA антеннасы, ал [93] жұмыста когнитивті радиоға арналған, жиілігі қайта бапталатын антенна сипатталған. Наножелілік байланысқа арналған графен негізіндегі икемді терагерцтік антенна торлары [94] жұмыста қарастырылған. Мұндай антенналарды сипаттауда қолданылатын радиотехникалық терминдердің анықтамалары [95] құжатта берілген.

Меншікті жұтылу коэффициентін төмендету үшін әдебиеттерде антеннаға қосымша электромагниттік құрылымдар енгізіледі. Жасанды магниттік өткізгіш (AMC) пен электромагниттік тыйым салынған аралығы бар (EBG) құрылымдар антеннаның денеге қарай сәулеленуін азайтады. [96] жұмыста монополь антеннаның астына орналастырылған AMC-негіз WBAN-қолданбаларында күшейту коэффициентін арттырып, МЖК-ны төмендеткен және антеннаның конформдылығын сақтаған. [97] жұмыста EBG-құрылымы мен қос L-тәрізді қоректендіруі бар ықшам текстильді антенна ұсынылған, бірақ элемент асимметриялы болғандықтан, оның сипаттамалары поляризацияға тәуелді.

Резонаторлық және метаматериалдық құрылымдар өткізу жолағын басқару және денеге әсерді азайту үшін де пайдаланылады. [98] жұмыста үш диапазонда жұмыс істейтін, CRLH-құрылымына негізделген, жерге тұйықтау қабаты ақаулы ықшам резонатор қарастырылған. [99] жұмыста медициналық құрылғыларға арналған AMC-негізді «жел диірмені» антеннасы, [100] жұмыста денелік желілерге арналған метаматериалдық құрылымы бар икемді екідиапазонды антенна сипатталған. Жерге тұйықтау қабатындағы ақаулы құрылымдары бар (DGS) суб-6 ГГц диапазонындағы антенналар [101, 102] жұмыстарда сандық оңтайландыру әдістерімен, соның ішінде Нелдер–Мид симплекс әдісімен, МЖК төмен болатындай етіп жобаланған.

МЖК айтарлықтай төмендеуін шағын өлшемді монополды конструкциялар да қамтамасыз етеді: [103] еңбегінде интеллектуалды жүйелерге арналған МЖК төмендетілген ықшам икемді монополды антенна ұсынылған, [104] еңбегінде WBAN үшін метаматериалы және төмен МЖК-ы бар толықтай текстильді аса кең жолақты (UWB) антенна, ал [105] еңбегінде денеге және денеден тыс медициналық қолданбаларға арналған меандрлық желідегі икемді екі диапазонды антенна ұсынылған. Мұндай конструкциялардың механикалық деформацияларға төзімділігі мен аса кең жолақты қасиеттері [106] еңбегінде (ықшам икемді монополдардың иілуі мен уақыттық сипаттамаларын талдау) және [107] еңбегінде (қолданбаларға арналған сақиналы құрылымды аса кең жолақты антенна) зерттелген. Меншікті жұтылу коэффициентін модельдеу кезінде ток өткізгіш текстильді материалдарды дұрыс сипаттаудың маңызы зор: [108] жұмысында Zell ток өткізгіш матасының жоғары жиіліктегі электрөткізгіштігі эксперименттік түрде өлшенген, бұл электродинамикалық есептеу кезінде өткізгіш қабаттың тиімді электрөткізгіштігін беруге мүмкіндік береді.

Антенна сипаттамаларын жақсартудың бір жолы бірнеше сәулелендіргішті антенна торына біріктіру: элементтер саны артқанда күшейту коэффициенті мен бағыттылық өседі. Мұндай конструкцияның ерте мысалдарының бірі [22] жұмыста ұсынылған. Ол 2,45 ГГц жиілікке арналған, $\varepsilon_r$ = 1,15 мата төсеніштегі, корпоративтік (параллель) қоректендіру желісі бар екі элементті текстильді антенна торы. Шығынсыз модельде оның бағыттылық коэффициенті 11,82 dBi болған, бірақ прототиптің өлшенген күшейту коэффициенті есептік мәннен айтарлықтай төмен шыққан. Өткізу жолағы 34,8 МГц құраған, ал МЖК бағаланбаған. [25] жұмыста 2,45 ГГц диапазонына арналған, өткізгіш қабаты графеннен немесе ток өткізгіш матадан жасалған антенна сипатталған. Оның күшейту коэффициенті 5,45 dBi-ге дейін жеткен, воксельдік модельде есептелген МЖК төмен болған және антенна иілгенде жұмыс қабілетін сақтаған. МЖК-ны АМС және EBG құрылымдарымен төмендету [25, 36] жұмыстарда қарастырылған, алайда мұндай құрылымдар конструкцияны күрделендіріп, оны қалыңдатады. Күшейту коэффициентін арттыру мен МЖК-ны төмендетуге арналған АМС, EBG және PBG құрылымдарына жүйелі шолу [13] жұмыста берілген. Киетін IoT-қолданбаларына арналған текстильді антенналар мен антенна торларының сипаттамалары 4-кестеде салыстырылған.

4 кесте – IoT-ке арналған қолданыстағы текстильді антенналарды әзірленген антенна торымен салыстыру

| Дереккөз | Түрі / төсеніші | Жиілік, Гц | КК, dBi | МЖК, Вт/кг | АМС/EBG |
|---|---|---|---|---|---|
| [17] | патч / джинс | 2,45 | 2,63 | 0,0548 | жоқ |
| [83] | патч / тері | 2,45 | ≈2,0 | қалыпты | жоқ |
| [22] | 1×2 тор / текстиль | 2,45 | 11,82 (бағытталған, модельдік) | бағаланбаған | жоқ |
| [25] | патч/графенді мата | 2,45 | 5,45 | төмен | жоқ |
| [109] | 1×2 тор (MIMO)/фетр | 2,45 | 4,70 | бағаланбаған | жоқ |
| [84] | патч/джинс матасы | 2,4 | 4,0 | бағаланбаған | жоқ |

4-кестеде ұсынылған салыстырмалы талдау IoT-қосымшаларына арналған қолданыстағы антенналардың ішінде антенна торлары жеке патч-антенналармен салыстырғанда жоғары күшейту коэффициенті мен бағытталуды қамтамасыз ететіндігін көрсетеді. Әдебиеттерде ұсынылған АМС немесе EBG типті көпқабатты экрандаушы құрылымдарды енгізу арқылы меншікті жұтылу коэффициенті төмен шешімдердің көпшілігі конструкцияны күрделендіру іске асырылады. Бұл конструкцияның қалыңдығын арттырырады және иілгіштігін төмендетеді. Сонымен қатар, кең бұрыштық қамтуды, апертура өлшемін масштабтау мүмкіндігін және қосымша экрандаушы қабаттарды қолданбай-ақ

меншікті жұтылу коэффициентін төмендету мүмкіндігін бір құрылымда үйлестіретін бір қабатты текстильді төсеніштегі екі элементті сызықтық антенна торлары қолданыстағы зерттеулерде жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Бұл кең бұрыштық қамтуды және конструкцияның қарапайым бір қабатты құрылымын сақтай отырып, адам ағзасына түсетін электромагниттік әсерді барынша азайтуды талап ететін IoT-қосымшалары үшін екі элементті сызықтық антенна торын осы жұмыста зерттелетін бірінші топология ретінде таңдауды негіздейді.

Күшейту коэффициентін арттырудың және сәулеленудің бағытталуын қамтамасыз етудің тағы бір тәсілі – Яги–Уда және quasi-Yagi конструкцияларын қолдану. Мұндай антенналардың микрожолақты орындалуы 1980 жылдардың соңынан бастап зерттеліп келеді және көптеген конструкциялар түрінде ұсынылған: [110] шолуына сәйкес, микрожолақты Яги–Уда антенналарының басым көпшілігі қатты диэлектрлік негіздерде (FR-4, RT/duroid және т.б.) 900 МГц-тен 7 ГГц-ке дейінгі диапазондарда іске асырылып, шамамен 4-8 dBi күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді. Олардың типтік мысалы ретінде [23] жұмысын келтіруге болады. Онда қалыңдығы 1,58 мм RT/duroid 5880 негізіндегі активті элементтен, екі рефлектордан және сегіз директордан тұратын кең жолақты микрожолақты Яги–Уда торы генетикалық алгоритм арқылы оңтайландырылған. Ол 5,5 ГГц WLAN диапазонында 10-12,4 dBi күшейту коэффициентін, 18 dB-ге дейінгі алға/артқа бағытталған сәулелену қатынасын және 22 % салыстырмалы сәйкестендіру жолағын қамтамасыз етеді. Мұндай жоғары көрсеткіштерге шығыны аз қатты негізді, көп элементті V-тәрізді компоновканы және өлшемі 150×90 мм жерге тұйықтау қабатын қолдану арқылы қол жеткізілген, бұл конструкцияны киімге кіріктіруге мүмкіндік бермейді. [111] жұмысы да көрсеткішті болып табылады. Онда 2,4 ГГц жиілігіне арналған бес директоры бар жазық Яги–Уда антеннасы FR-4 және Rogers RO3003 қатты негіздерінде орындалып, диэлектрик түрі, директорлар саны мен ұзындығы және жерге тұйықтау өлшемдері бойынша оңтайландырылған. Нәтижесінде күшейту коэффициенті 30 %-ға (4,84 dBi-ге дейін) арттырылып, өткізу жолағы 23 %-ға дейін кеңейтілген. Сонымен қатар авторлар жүргізген меншікті жұтылу коэффициентін, электр және магнит өрістерінің кернеуліктерін және қуат ағынының тығыздығын талдау антеннаға тікелей жақын орналасқан жағдайда ICNIRP шекті мәндерінің асып кететінін көрсетті, осыған байланысты оны адам денесінен алшақ орналастыру ұсынылған.

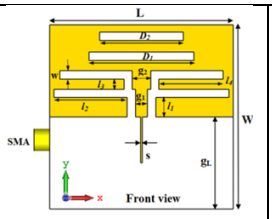
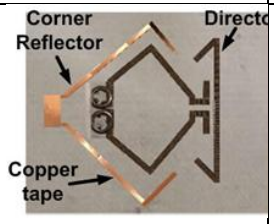
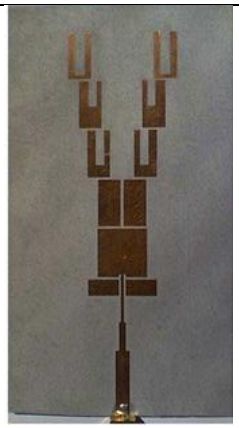
Яги–Уда топологиясын икемді негіздерге көшіру әрекеттері аралас конструкцияларды қолдану арқылы жүргізілді. [24] жұмысында Rogers 4350B жұқа икемді негізінде микрожолақты қоректендіруі бар комплементарлық (саңылаулы) Яги–Уда антеннасы ұсынылып, 2,44 ГГц диапазонында шамамен 8 dBi күшейту коэффициентін қамтамасыз етті. Дегенмен оның конструкциясы резонанстық қуыстары бар қалыңдығы 7 мм фрезерленген металл пластинаны талап етеді, ал бағытталу диаграммасының негізгі жапырақшасы нормаль бағыттан 46°-қа ауытқыған. Бұл антеннаны текстильді антеннаға жатқызуға мүмкіндік бермейді, сондай-ақ оның дайындалуы мен денеге кіріктіруін күрделендіреді.

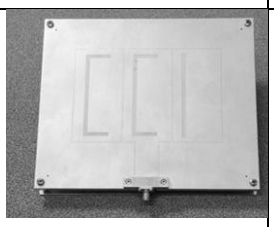
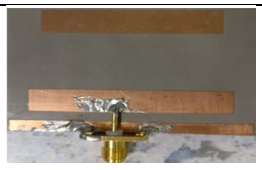
Қолданбалар контекстінде жазық quasi-Yagi конструкциялары да белгілі. [112] жұмысында spider-monkey алгоритмі арқылы оңтайландырылған, 2,45 және 3,5 ГГц жиіліктерінде жұмыс істейтін жазық quasi-Yagi антеннасы ұсынылып, 5,7–5,8 dBi күшейту коэффициенті алынған. Бағытталған антеннаның текстильді төсеніштегі қазіргі жұмысқа ең жақын іске асырылуы – UHF-RFID жақын өріс оқырмандарына арналған ықшам Яги тәрізді текстильді антенна [26], ол 1,8, 2,45 және 5,8 ГГц диапазондарында тиісінше 3,7, 5,3 және 9,6 dBi күшейту коэффициенттерімен жұмыс істейді. Алайда бұл антенна көпжиілікті жақын өріс оқырманы болып табылады және 2,45 ГГц диапазонында небәрі 5,3 dBi күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді. Осы жұмысқа негізгі белгілерінің жиынтығы бойынша (quasi-Yagi бағытталған топологиясы, текстильді орындалуы, WBAN денелік желісі және меншікті жұтылу коэффициентін бағалау) ең жақын конструкция [113] жұмысында ұсынылған UHF-RFID оқырманының антеннасы болып табылады. Онда жерге тұйықтау қабаты бар периодтық метапбетке орналастырылған quasi-Yagi сәулелендіргіші білек бойымен торцевік (end-fire) сәулеленуді қамтамасыз етіп, 5,9 dBi бағытталу қасиетіне және 3,8 м оқу қашықтығына ие болған. Метапбеттің жерге тұйықтау қабаты бір мезгілде адам денесін экрандайды, соның арқасында EIRP = 0,56 Вт болғанда модельдеу бойынша меншікті жұтылу коэффициенті 0,191 Вт/кг құрап, FCC нормаларына сәйкес келген. Сонымен қатар, аталған конструкция UHF диапазонында (915 МГц) іске асырылған және толықтай текстильді конструкция болып табылмайды.

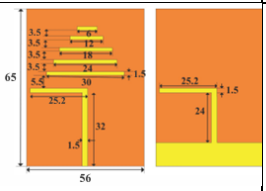
2,45 ГГц диапазонына арналған толықтай текстильді антенналар патч-конструкция түрінде дамуда: [25] жұмысында джинс мата және фетр төсеніштеріндегі, өткізгіш қабаты графеннен немесе ток өткізгіш матадан жасалған текстильді патч-антенналар ұсынылған. Олар 5,45 dBi-ге дейінгі күшейту коэффициентін және өте төмен меншікті жұтылу коэффициентін қамтамасыз етіп, иілуге төзімділігін көрсетті. Алайда патч-топология қол жеткізуге болатын күшейту коэффициентін шектейді. Текстильді антенналардың электромагниттік қауіпсіздік нормаларына сәйкестігі басқа топологиялар үшін де расталған: [14] жұмысында джинс негіздегі екі диапазонды монополды антеннаның меншікті жұтылу коэффициенті адам денесінің воксельдік моделінде FCC және ICNIRP нормаларына сәйкес валидацияланған. IoT-қа арналған қолданыстағы бағытталған антенналардың сипаттамалары 5-кестеде келтірілген.

5 кесте – IoT-қа арналған қолданыстағы бағытталған Яги–Уда антенналары

| Дерек көз | Антеннаның суреті | Топология | Төсеніш (тип) | f, ГГц | КК, dBi | Тағылуы | Ерекшеліктері / шектеулері |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [112] |  | Жазық quasi-Yagi | Жазық (қатты) | 2,45 / 3,5 | 5,7-5,8 | Шект. | Spider-monkey оңтайландыруы; қосжиіліктті |
| [26] |  | Яги–Уда тәрізді | Текстильді | 1,8 / 2,45 / 5,8 | 3,7 / 5,3 / 9,6 | Иә | UHF-RFID жақын өріс оқу құрылғысы; көпжиіліктті; 2,45 ГГц кезінде КК – 5,3 dBi |
| [23] |  | Микрожолақты Яги–Уда антенналары (11 элемент) | RT/duroid 5880 (қатты) | 5,5 | 10-12,4 | Жоқ | 11 элемент, V-тәрізді орналасу, генетикалық алгоритммен оңтайландыру; F/B – 18 dB, өткізу жолағы 22 %; экран өлшемі – 150×90 мм |
| [111] |  | Планарлық Яги-Уда (5 директор) | FR-4 / Rogers RO3003 (қатты) | 2,4 | 4,84 | Жоқ | Директорлар мен жерге тұйықтау құрылымының геометриясын оңтайланд |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | ыру; денеге жақын орналасқанда МЖК және өріс мәндері ICNIRP нормаларынан асып түседі |
| [24] |  | Комплементарлық (саңылаулы) Яги-Уда | Rogers 4350B + фрезерленген металл пластина, 7 мм | 2,44 | ≈8 | Шект. | Қуыстары бар қалың металл негіз; сәуле көлбеуінің бұрышы – 46°; дайындау технологиясы күрделі |
| [25] |  | Патч (тікбұрышты / үшбұрышты / дөңгелек) | Джинсмата/фетр, графен/мата | 2,45 | 5,45 | Иә | Толығымен текстильдік; МЖК өте төмен (0,002–0,033 Вт/кг); патч үшін КК – орташа |
| [114] |  | Біржазықтықты микрожолақты Яги | Қатты | 2,45 | 8,2 | Жоқ | F/B > 18 dB; ұштық бағытта сәулелену |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [115] |  | Планарлық Яги–Уда (айна тәрізді жерге тұйықтау қабаты) | FR-4 (қатты) | 2,45 | 4,34 | Жоқ | Бес директор; WLAN үшін |
| [116] |  | Иілгіш Яги-Уда | Полиимид (иілгіш) | 2,48 | - | Иә | Иілу кезіндегі талдау; WBAN үшін |

5 кестедегі салыстырмалы талдау көрсеткендей, Яги–Уда типті бағытталған антенналар қарастырылған конструкциялардың ішінде ең жоғары күшейту коэффициентін (шамамен 8-12,4 dBi) қамтамасыз етеді. Алайда әдебиеттерде осындай күшейтуге қол жеткізетін барлық шешімдер не қатты диэлектрлік негіздерде (RT/duroid, FR-4, Rogers) [23, 111], не резонанстық қуыстары бар қалың металл негіздерді қолдану арқылы [24] іске асырылған, бұл оларды киімге толыққанды кіріктіруге мүмкіндік бермейді. Ал текстильді конструкциялар патч-топологиямен (5,45 dBi-ге дейін [25] немесе көпжиілікті жақын өріс оқырмандарындағы Яги-тәрізді шешімдермен 2,45 ГГц жиілігінде 5,3 dBi [26] шектеледі. Осылайша, қолданыстағы шешімдерде бағытталған Яги–Уда топологиясы, жоғары күшейту коэффициенті және толықтай текстильді бір қабатты орындалу сипаттарының барлығы бір уақытта үйлеспейді. Анықталған олқылық мүмкіндігін және электромагниттік қауіпсіздікті сақтай отырып, жоғары күшейтумен бағытталған сәулелену қажет ететін алыс қашықтықтағы IoT-байланыс міндеттері үшін екінші зерттелетін топология ретінде бір қабатты текстильді төсеніштегі толық өлшемді микрожолақты Яги–Уда антеннасын таңдауды негіздейді.

Торцевтік сәулеленуі бар микрожолақты Яги–Уда антенналары үшін әдебиеттерде 2,45 ГГц жиілігіне арналған бірқатар конструкциялар ұсынылған. [114] жұмысында қатты негізде орындалған, 8,2 dBi-ге дейінгі күшейту коэффициентін және 18 dB-ден жоғары «алға/артқа» қатынасын қамтамасыз ететін бір жазықтықты торцевтік сәулелену микрожолақты антеннасы іске асырылған. WLAN үшін жердің айна жазықтығы бар жазық Яги–Уда антеннасы [115] еңбегінде сипатталған, онда FR-4 негізінде 4,34 dBi күшейту коэффициентіне қол жеткізілген. Сымсыз денелік желілерге арналған полиимидті негіздегі икемді Яги–Уда антеннасы [116] жұмысында зерттелген, мұнда негізгі назар резонанстық жиілік пен бағытталу диаграммасының иілуге төзімділігіне аударылған. Келтірілген конструкциялар Яги–Уда топологиясының қолданбалар үшін перспективалы екенін растайды. Алайда олар не қатты негіздерде орындалған, не толықтай текстильді конструкция түрінде іске асырылмаған. Заттар интернеті қосымшаларына қатысты көпқабатты микрожолақты Яги–Уда антенналарына жүргізілген, қарастырылған

конструкцияларды жинақтайтын аналитикалық шолуды осы жұмыстың авторы [117] еңбегінде орындаған.

Осылайша, Яги–Уда топологиясын (рефлекторы және екі директоры бар толық өлшемді сәулелендіргішті) таңдау мүмкіндікті және электромагниттік қауіпсіздікті сақтай отырып, күшейту коэффициенті мен сәулелену бағытталуын бір мезгілде арттыруға мүмкіндік берді. Белгілі шешімдерден (қатты негіздердегі Яги микрожолақты антенналардан [23, 110], металл негізі бар гибридті саңылаулы Яги–Уда антеннасынан [24], көпжиілікті текстиль Яги-тәрізді жақын өріс оқырманынан [26] және текстильді патч-антенналардан [25]) айырмашылығы, осы жұмыста алғаш рет 2,45 ГГц диапазонына арналған бір қабатты текстильді төсеніштегі толық өлшемді микрожолақты Яги–Уда антеннасы іске асырылды. Бұл аталған топологияны алыс қашықтықтағы IoT-байланыс міндеттері үшін таңдауды негіздейді.

Көрсетілген тәсілдерден айырмашылығы, Яги–Уда топологиясы күшейту коэффициентін активті элемент орналасқан сол бір ғана өткізгіш қабатта орналасқан және гальваникалық байланыссыз шеткі өріс арқылы қоздырылатын пассивті элементтер есебінен арттыруды қамтамасыз етеді. Соның нәтижесінде қосымша қоректендіру желісі, өтпелі тесіктер немесе қосымша қабаттар қажет болмайды: қабаттар саны, қалыңдығы және конструкцияның технологиялық күрделілігі жеке патчтағыдай деңгейде қалады. Осылайша, Яги–Уда топологиясы бірдей қабаттар саны мен бірдей дайындау технологиясы жағдайында торлы немесе жеке патч-конструкцияларға қарағанда жоғары күшейту коэффициентін алуға мүмкіндік береді, бұл оның екінші зерттелетін топология ретінде таңдалуына негіз болды.

Екі элементті сызықтық антенна торын бірінші зерттелетін топология ретінде таңдау жеке сәулелендіргіш элементте іске асыру мүмкін емес торлы архитектураның принципті мүмкіндіктерімен негізделген. Геометриясымен сипаттамалары қатаң анықталатын жеке патчтан айырмашылығы, антенна торы элементтер санын және қоздырудың таралуын өзгерту арқылы бағытталу диаграммасының пішінін басқаруға және оны масштабтауға мүмкіндік береді. Бұл дайындау технологиясын өзгертпей апертураны одан әрі ұлғайтуға (1×2 → 1×4 → 2×2) және сәулені қалыптастыруға (beam-forming) жол ашады. Антенна торын денеге орналастырудың тағы бір артықшылығы бар. Сәулеленетін қуат төсеніште бір-бірінен қашық тұрған элементтерге бөлінеді, сол себепті тіндердегі өрістің жергілікті тығыздығы, онымен бірге меншікті жұтылу коэффициенті де азаяды [81]. Бір элементке шаққанда жеке патч-антеннаның күшейту коэффициенті жоғарырақ болуы мүмкін, бірақ торды элементтер санын арттыру арқылы (1×2-ден 1×4 немесе 2×2-ге дейін) масштабтауға болады.

Жұмыста зерттелетін екі топологияның міндеті әртүрлі. Екі элементті сызықтық антенна торының құрылымы қарапайым, сондықтан бірдей геометрияда үш текстильді төсеніш пен екі өткізгіш материалдан алты конфигурация жасап, оларды өзара салыстыруға болады. Демек, тор төсеніш материалының антенна сипаттамаларына әсерін анықтайтын құрал қызметін атқарады. Сонымен қатар оның МЖК мәні төмен.

Тор арқылы анықталған заңдылықтар Яги–Уда антеннасын әзірлеуге негіз болды. 4- және 5-кестелердегі әдеби деректер бұл топологияның қосымша қабаттарсыз және металл құрылымдарсыз бағытталған сәулелену мен жоғары күшейту коэффициентін беретінін көрсетеді. Мұндай антенна денеден тыс (off-body) байланысқа, яғни киетін құрылғы мен сыртқы қабылдағыш арасындағы арнаға лайық.

Екі антенна да бір текстильді төсеніш қабатында жасалған, оларға AMC, EBG немесе қуыс резонатор сияқты қосымша құрылымдар қажет емес.

***1-бөлім бойынша қорытынды***

Бірінші тарау бойынша мынадай тұжырымдар жасалды. Антенналарды модельдеу үшін текстильді төсеніштердің (фетр, джинс матасы, полиэстер) және өткізгіш материалдардың (мыс таспа, ток өткізгіш мата) электрофизикалық параметрлері жинақталды. Төсеніштердің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі 1,45–1,9 аралығында жатыр, бұл дәстүрлі қатты төсеніштердің мәндерінен (2,2–12) төмен. Басқа параметрлер бірдей болғанда $\varepsilon_r$-дің аз болуы өткізу жолағын кеңейтеді, бірақ антенна өлшемін үлкейтеді.

IoT жүйелеріне арналған киетін антенналарды салыстыру нәтижесінде қосымша AMC, EBG немесе қуыс резонатор құрылымдарынсыз, бір текстильді төсеніш қабатында орындалатын екі топология таңдалды: екі элементті сызықтық антенна торы және Яги–Уда антеннасы. Антенна торы алты конфигурацияны бірдей геометрия жағдайында салыстыруға мүмкіндік беретіндіктен, төсеніш материалының антенна сипаттамаларына әсерін анықтау құралы ретінде алынды. Яги–Уда антеннасы бұл заңдылықтарды қолданатын конструкция ретінде таңдалды, себебі ол қосымша қабаттарсыз жоғары күшейту коэффициентін алуға мүмкіндік береді.

Тараудың нәтижелері автордың [6, 11, 33] жұмыстарында жарияланған.

## 2 Киетін микрожолақты антенналарды жобалау әдістемесі және геометриялық параметрлері

### 2.1 Қоректендіру тәсілдері және жобалау әдістемесі

Бұл тарауда 2,45 ГГц ISM диапазонына арналған, текстильді төсеніштегі микрожолақты антенналарды жобалау әдістемесі баяндалады. Әдістеме кейінгі тарауларда зерттелетін екі конструкцияға, яғни екі элементті сызықтық антенна торы мен Яги–Уда антеннасына ортақ. Тарауда қоректендіру тәсілін таңдау, геометриялық параметрлерді аналитикалық есептеу, сипаттамаларды бағалау өлшемшарттары және параметрлік оңтайландыру алгоритмі қарастырылады. Қоректендіру тәсілі конструкцияның дайындалу қиындығын және деформация кезіндегі тұтастығын анықтайтындықтан, жобалау осы тәсілді таңдаудан басталады.

Микрожолақты антенналарды қоздырудың негізгі тәсілдері: коаксиалды зонд, микрожолақты желі, электромагниттік байланыс (proximity-coupled) және апертура арқылы байланыс (aperture-coupled). Соңғы екеуі түйіспесіз тәсілдерге жатады [10]. Коаксиалды зонды іске асыру оңай және қоректендіру нүктесін еркін таңдауға мүмкіндік береді, бірақ өткізу жолағы тар (2–5 %) және төсеніште тесік бұрғылауды қажет етеді. Икемді матада мұндай тесік пен коннектордың дәнекерленген жері иілгенде бұзылуы мүмкін. Түйіспесіз тәсілдер (proximity-coupled және aperture-coupled қоректендіру) өткізу жолағын кеңейтіп, паразиттік сәулеленуді азайтады. Алайда олар көпқабатты құрылымды және қабаттардың дәл қиысуын талап етеді, ал оңай деформацияланатын матада бұл талапты орындау қиын [10].

Микрожолақты желімен қоректендіруде желі сәулелендіргішпен бір өткізгіш қабатта жатады, сондықтан тесік бұрғылаудың да, қабаттарды қиыстырудың да қажеті жоқ.

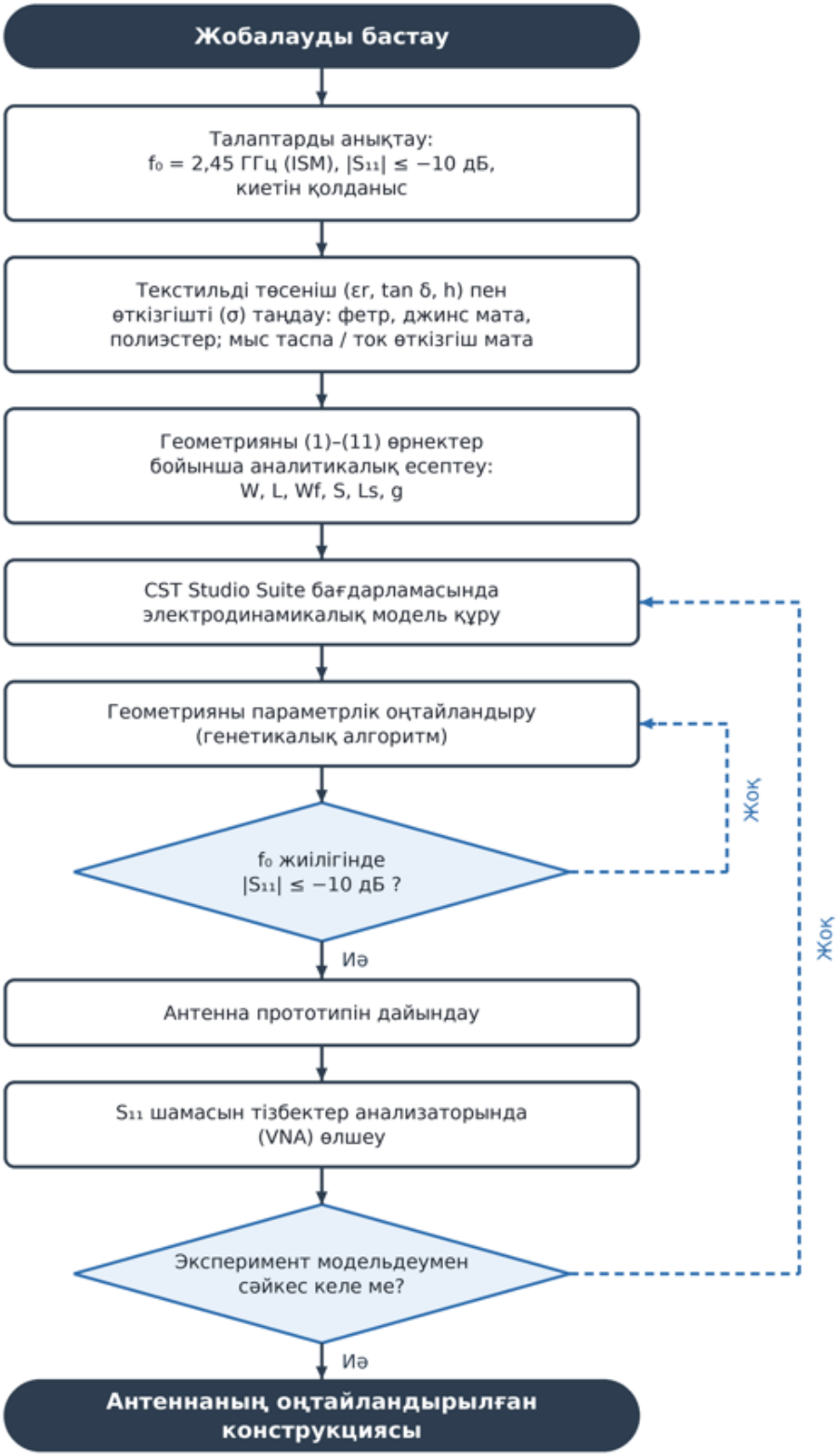
Жазық құрылым иілгенде тұтастығын сақтайды, прототипті дайындау да жеңілдейді. Осы екі артықшылыққа байланысты екі антенна да микрожолақты желі арқылы қоректендірілді [10]. Бұл тәсілде қоздырушы желі патчқа жалғанады, ал кіріс кедергісі 50 Ом трактіге желі енін және қоздыру нүктесінің орнын өзгерту арқылы сәйкестендіріледі. Желі мен патч арасындағы байланыс дәрежесі қоздыру нүктесінің сәулелендіргіш жиектен $x_0$ ығысуына тәуелді:

$$K(x_0) = cos\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) \quad (1)$$

мұндағы $L$ – патчтың резонанстық ұзындығы; $x_0$ – қоректендіру нүктесінің жиектен ығысуы.

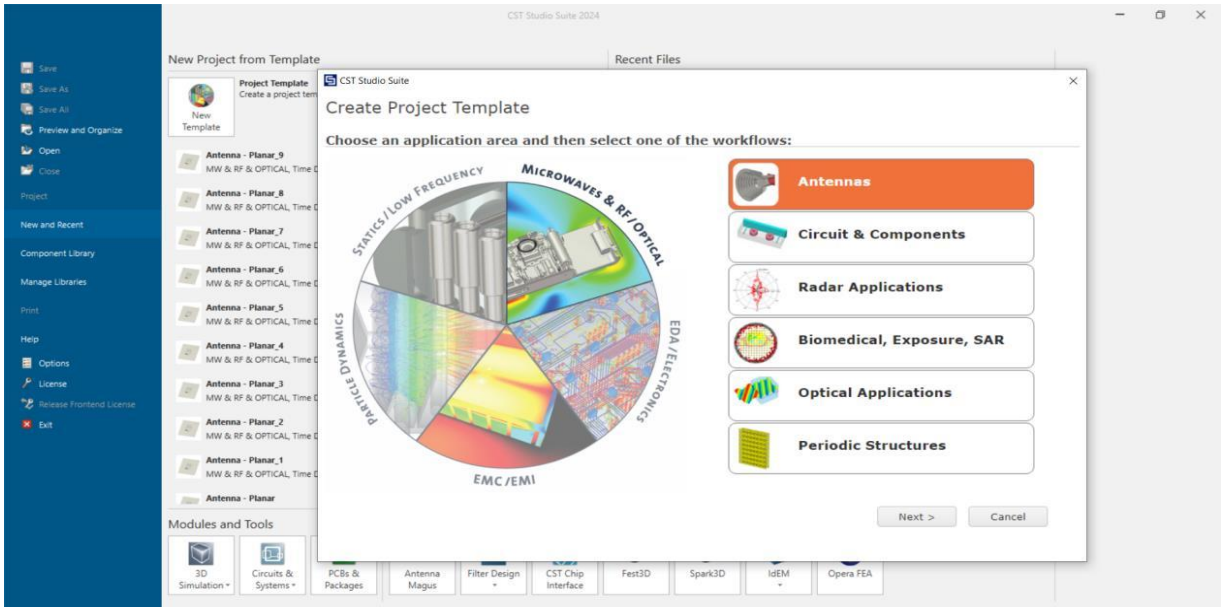
Қоздыру нүктесі жиекте ($x_0 = 0$) орналасқанда кіріс кедергісі ең үлкен мәніне жетеді, ал нүкте патчтың ортасына қарай ығысқан сайын кедергі азаяды. Қоздыру нүктесін ішке жылжыту үшін патчта желінің екі жағынан тар ойықтар кесіледі (inset feed). Бұл құрылымның жазықтығын сақтай отырып, кіріс кедергісін 50 Ом-ға дейін реттеуге мүмкіндік береді. Микрожолақты желі арқылы қоректендірілетін антеннаның құрылымы 1-суретте көрсетілген.

Екі антенна үш кезеңде әзірленді [81]. Алдымен микрожолақты антенналар теориясының классикалық өрнектері бойынша геометриялық параметрлер есептелді. Содан кейін бұл өлшемдер CST Studio Suite бағдарламасында генетикалық алгоритм арқылы оңтайландырылды. Соңында оңтайландырылған параметрлер бойынша прототиптер дайындалды. Екі антеннаға ортақ жобалау және оңтайландыру алгоритмі 4-суретте келтірілген.

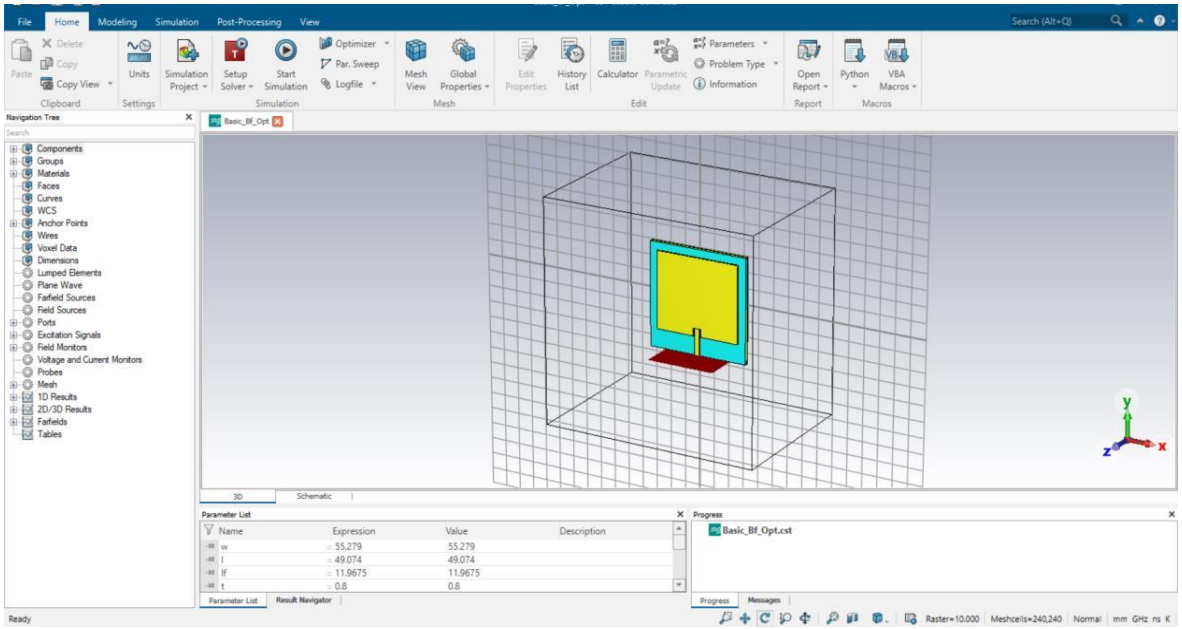



4 сурет – Микрожолақты антеннаны жобалау және оңтайландыру алгоритмі

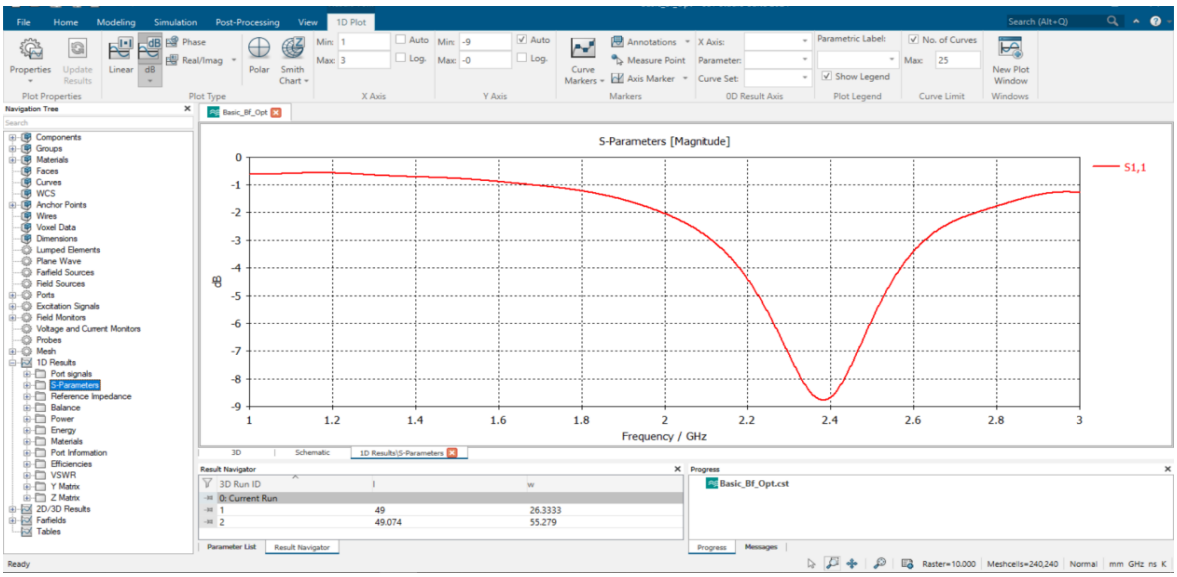
Антенналарды электродинамикалық модельдеу мен оңтайландыру CST Studio Suite 2024 бағдарламасында орындалды. Бағдарлама Максвелл теңдеулерін үш өлшемді кеңістікте сандық әдістермен шешеді: уақыт аймағында ақырлы интегралдау әдісі (FIT), жиілік аймағында ақырлы элементтер әдісі (FEM) қолданылады [118]. Бұл жұмыста есептеулер уақыт аймағындағы (Time Domain, FIT) / жиілік аймағындағы (Frequency Domain, FEM)] шешушімен жүргізілді. Жобаны құру, модельді қалыптастыру, антенна торын модельдеу және есептелген S-параметрлерді талдау кезеңдеріндегі бағдарлама интерфейсі 5–7-суреттерде көрсетілген.




5 сурет – CST Studio Suite бағдарламасында жоба құрудың бастапқы терезесі (шаблонды таңдау)




6 сурет – CST Studio Suite бағдарламасының жұмыс аймағы және антенна моделі




7 сурет – CST Studio Suite бағдарламасында S-параметрлерді ($S_{11}$) есептеу нәтижелерінің терезесі

Екі антеннаның да электродинамикалық моделі үш өлшемді кеңістікте көлемдік примитивтердің жиынтығы түрінде құрылды, олардың әрқайсысына тиісті материалдың электрофизикалық қасиеттері берілді: текстильді төсенішке – сақиналы резонатор әдісімен өлшенген салыстырмалы диэлектрлік өтімділік пен диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсі; өткізгіш қабаттарға – өлшенген беттік кедергі негізінде анықталған меншікті электрөткізгіштік. Текстильді құрылым тұтас жіптердің жеке модельдерін нақты көрсетпей, эквивалентті электрөткізгіштігі бар біртекті қабатпен алмастырылатын өткізгіш қабатты осылай сипаттау макроскопиялық резистивтік шығындарды дұрыс ескеруге және есептеу торының өлшемділігін арттырмауға мүмкіндік береді.

Есептеу ақырлы интегралдау әдісін (FIT) жүзеге асыратын уақыт аймағындағы шешуші көмегімен жүргізілді. Аталған шешуші бір есептеу циклі барысында кең жиілік диапазоны бойынша жиіліктік сипаттамаларды алуға мүмкіндік береді. Осы ерекшелігі оны есептеулерді бірнеше рет қайталауды талап ететін параметрлік оңтайландыру міндеттерін орындау кезінде тиімді құрал етеді. Гексаэдрлік есептеу торы өрістің күшті біртектілігі байқалатын аймақтарда (сәулелендіргіш патчтың жиектеріне жақын жерде, ойық аймағында, қоректендіру желісінің бойында және Яги–Уда антеннасының пассивті элементтері арасындағы саңылауларда) жергілікті қоюландырумен адаптивті режимде қалыптастырылды. Ұяшықтың минималды өлшемі өткізгіш қабат пен текстильді төсеніштің қалыңдығын ажыратып көрсету шартымен төменнен шектелді, ал максималды өлшемі диэлектрлік өтімділігі ең жоғары материалдағы толқын ұзындығына кемінде жиырма ұяшық сәйкес келуі талабымен шектелді. Торды адаптивті ұсақтау жұмыс жиілігіндегі шағылу коэффициентінің екі бірізді итерация арасындағы салыстырмалы өзгерісі бір пайыздан аз болғанға дейін жүргізілді, бұл тордың жинақталу өлшемшарты ретінде қабылданды.

Есептеу облысының барлық шекараларына еркін кеңістікті сипаттайтын шарттар орнатылды. Бұл үшін идеалды сәйкестендірілген қабат (PML)

қолданылды. Мұндай шекаралық шарттар электромагниттік толқындардың есептеу облысынан шағылусыз шығуын және еркін кеңістікте таралуын модельдеуге мүмкіндік береді. Облыс шекарасы мен конструкцияның оған ең жақын орналасқан элементтері арасындағы қашықтық есептеу диапазонының төменгі жиілігіне сәйкес келетін толқын ұзындығының кемінде төрттен біріне тең етіп алынды.

Антеннаны қоздыру микрожолақты қоректендіру желісінің жиегі мен жерге тұйықтау қабаты арасына қосылған 50 Ом дискретті порт арқылы орындалды. Мұндай тәсіл эксперименттік үлгіде SMA қосқышы арқылы коаксиалды трактіні жалғау жағдайына сәйкес келеді. Электродинамикалық есептеу 1,0–4,0 ГГц жиілік аралығында жүргізілді. Таңдалған диапазон 2,4–2,5 ГГц жұмыс жолағындағы негізгі резонансты қамтиды. Сонымен қатар көп элементті конструкцияда пайда болуы мүмкін қосымша резонанстарды анықтауға мүмкіндік береді. Есептеу облысында жинақталған қалдық энергия бастапқы максималды деңгеймен салыстырғанда 40 dB-ге төмендеген кезде есептеу процесі тұрақталған деп қабылданды. Иілу әсерін зерттеу үшін жазық модельдің геометриясы өзгертілді. Деформацияланған модель негіздің ортаңғы бетінің ұзындығын сақтай отырып, берілген радиустағы цилиндрлік бетке орналастырылды. Мұндай модельдеу тәсілі негіз жіптері бойымен созылмайтын тоқылған материалдың нақты иілу ерекшелігіне жақын келеді. Электромагниттік қауіпсіздікті бағалау кезінде есептеу облысына адам денесінің воксельдік моделі енгізілді. Модельде биологиялық тіндердің жиілікке тәуелді электрофизикалық қасиеттері ескерілді. Дене моделіндегі есептеу торының өлшемі электрөткізгіштігі жоғары тіндердегі электромагниттік өрістің ену тереңдігін жеткілікті дәлдікпен сипаттау талабына сәйкес таңдалды.

Параметрлік оңтайландыру бағдарламалық кешеннің кірістірілген оңтайландырғышы арқылы жүргізілді және генетикалық алгоритм қолданылды. Оның мақсаттық функциясы конструкцияның габариттік өлшемдеріне жоғарыдан шектеу қойылған жағдайда 2,45 ГГц жиілігіндегі шағылу коэффициентінің ең төмен мәнін анықтауға негізделді. Параметрлердің өзгеру диапазондары аналитикалық бастапқы жуықтаудан ±30 % ауытқу ретінде берілді; тоқтату өлшемшарты белгіленген ұрпақтар саны ішінде мақсаттық функцияның жақсармауы болды. Әрбір жағдайда оңтайландыру нәтижелері тор қателігіне байланысты шешімнің алынуына жол бермеу мақсатында тығыздатылған торда бақылау есебі арқылы тексерілді.

Жобалау әдістемесінің аналитикалық есептеу мен сандық оңтайландыруды біріктіруі кездейсоқ емес. Классикалық аналитикалық өрнектер біртекті, жұқа және шығыны аз төсеніштегі жеке патчқа арналып шығарылған. Текстильді төсеніш жағдайында бұл шарттар толық орындалмайды: маталардың өтімділігі өте төмен, қалыңдығы жұмыс толқын ұзындығымен салыстырғанда елеусіз емес, ал антенна торында және Яги–Уда антеннасында элементтер бір-бірімен өзара әрекеттеседі. Сондықтан аналитикалық есептеу соңғы нәтиже емес, оңтайландыру басталатын негізделген бастапқы нүкте ретінде қолданылды. Бұл тәсіл оңтайландыру алгоритмінің іздеу аймағын тарылтып, есептеу уақытын қысқартады және физикалық мағынасы жоқ шешімдерге келу қаупін азайтады.

Геометриялық параметрлердің әрқайсысы антенна сипаттамаларына өзіндік әсер етеді. Сәулелендіргіштің ұзындығы негізінен резонанстық жиілікті анықтайды: ұзындық артқан сайын резонанс төменгі жиілікке ығысады. Сәулелендіргіштің ені кіріс кедергісіне, өткізу жолағына және сәулелену тиімділігіне әсер етеді. Қоректендіру ойығының тереңдігі кіріс кедергісін 50 Ом-ға келтіру үшін қолданылады және резонанстық жиілікке аз әсер етеді. Жерге тұйықтау қабатының өлшемдері кері сәулелену деңгейіне және адам денесін экрандау дәрежесіне әсер етеді. Осы параметрлердің әсері бір-бірінен толық тәуелсіз емес, сондықтан оларды кезекпен емес, бір мезгілде оңтайландыру тиімдірек. Генетикалық алгоритмді таңдау осы себепке байланысты: ол бірнеше өзара байланысты параметрді қатар өзгертуге және жергілікті минимумдарда тұрып қалмай, ғаламдық оңтайлы шешімге жақындауға мүмкіндік береді.

Оңтайландырудың негізгі мақсаты ретінде 2,45 ГГц жиілігіндегі шағылу коэффициентін барынша азайту алынды. Бұл мақсат сәйкестендірудің жақсаруын ғана емес, резонанстың нысаналы жиілікке дәл түсуін де қамтамасыз етеді. Сонымен қатар оңтайландыру кезінде прототипті дайындау мүмкіндігі де ескерілді: элементтердің өлшемдері мен олардың арасындағы саңылаулар матаны қолмен қию дәлдігімен іске асырылатындай болуы қажет. Өте жұқа желілер мен тар саңылаулар модельде жақсы нәтиже беруі мүмкін, бірақ матада оларды дәл қайталау қиын. Сондықтан геометрияны таңдауда электродинамикалық сипаттамалар мен технологиялық орындалу мүмкіндігі арасындағы ымыраға келу қажет болды.

Текстильді төсеніштерді модельдеуде маңызды мәселе – материал параметрлерінің дәлдігі. Модельге енгізілетін өтімділік пен шығын тангенсі нақты матаның қасиеттерін орташа түрде сипаттайды. Егер бұл мәндер нақты матаның қасиеттерінен ерекшеленсе, модельдегі резонанстық жиілік пен өлшенген жиілік арасында айырмашылық пайда болады. Сондықтан модельдеу нәтижелерін тәжірибе жүзінде тексеру әдістеменің міндетті кезеңі ретінде қарастырылды.

Сәулелендіргіш патчтың ені $W$ келесі қатынас арқылы анықталады:

$$W = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}} \tag{2}$$

мұндағы $c$ – жарықтың жылдамдығы, $f_0$ – жұмыс жиілігі, $\varepsilon_r$ – негіздің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі.

Шеткі өрістің әсерін ескеретін тиімді диэлектрлік өтімділік мынадай өрнекпен есептеледі:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{W}\right]^{-1/2} \tag{3}$$

мұндағы $h$ – негіздің қалыңдығы. Патчтың тиімді электрлік ұзындығы мынадай өрнекпен анықталады:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (4)$$

ал патчтың шеткі өріс әсерінен ұзаруы мынадай өрнекпен анықталады:

$$\Delta L = 0{,}412h\frac{(\varepsilon_{eff}+0{,}3)\left(\frac{W}{h}+0{,}264\right)}{(\varepsilon_{eff}-0{,}258)\left(\frac{W}{h}+0{,}8\right)} \quad (5)$$

Физикалық ұзындық патчтың тиімді ұзындығы мен екі еселенген ұзару шамасының айырмасы ретінде есептеледі:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (6)$$

Микрожолақты қоректендіру желісінің 50 Ом сипаттамалық кедергіні $Z_0 = 50$ *Ом* қамтамасыз ететін $W_F$ ені аралық H параметрі арқылы анықталады:

$$H = \frac{Z_0\sqrt{2(\varepsilon_r+1)}}{119{,}9} + \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left[ln\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{\varepsilon_r}ln\left(\frac{4}{\pi}\right)\right] \quad (7)$$

$$W_F = \left[\left(\frac{e^H}{8} - \frac{1}{4e^H}\right)^{-1}\right] \cdot 1{,}60 \quad (8)$$

Қоректендіру желісінің $L_F$ ұзындығы бағытталатын толқын ұзындығы арқылы анықталады:

$$L_F = \theta\frac{\lambda_g}{360^\circ} \quad (9)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \quad (10)$$

Жерге тұйықтау қабатының өлшемдері беттік толқындарды және кері сәулелену басу үшін қажетті қорды ескере отырып анықталады:

$$L_g = L + 6h \quad (11)$$

$$W_g = W + 6h \quad (12)$$

Микрожолақты антеннаның резонансы – жұмыс жиілігінде оның кіріс кедергісінің жорамал (реактивті) құраушысы нөлге айналатын режим. Соның нәтижесінде антенна қоректендіру трактімен сәйкестеніп, электромагниттік энергияны барынша жоғары тиімділікпен сәулелендіреді. Мұндай режим сәулелендіргіш элементтің электрлік ұзындығы құрылымдағы толқын ұзындығының жартысына еселік болған кезде, яғни патчтың физикалық ұзындығы жұмыс жиілігіндегі тиімді толқын ұзындығының шамамен жартысына тең болғанда пайда болады. Бұл жағдайда патчта ток пен кернеудің тұрып қалған

толқыны қалыптасады, ал $S_{11}$ шағылу коэффициентінің графигінде резонанстық минимум айқын байқалады. Келтірілген (2)-(12) қатынастар микрожолақты сәулелендіргіштің толық аналитикалық моделін құрайды. Патчтың ені $W$ (2) элементтің кіріс кедергісі мен сәулелену тиімділігін анықтайды, ал оның резонанстық жиілігі физикалық ұзындығы $L$ (6) арқылы анықталады. Электр өрісінің күш сызықтарының бір бөлігі төсеніш арқылы емес, патч жиектерінің үстіндегі ауа арқылы тұйықталатындықтан, тиімді диэлектрлік өтімділік $\varepsilon_{eff}$ (3) негіздің диэлектрлік өтімділігі $\varepsilon_r$ мен бірлік аралығындағы мәнді қабылдайды; дәл осы $\varepsilon_{eff}$ құрылымдағы толқынның фазалық жылдамдығын және соның нәтижесінде тиімді электрлік ұзындықты $L_{eff}$ (4) анықтайды. Шеткі өріс патчты әр жағынан $\Delta L$ (5) шамасына қосымша ұзартады, соның салдарынан физикалық ұзындық тиімді ұзындықтан $2\Delta L$-ге (6) кем болады. Диэлектрлік өтімділігі төмен жұқа текстильді төсеніштер үшін ($\varepsilon_r = 1{,}45\text{-}1{,}9$) ауада таралатын энергияның үлесі жоғары болады, бұл $\varepsilon_{eff}$ мәндерінің төмен болуына (шамамен 1,3-1,6) және соның нәтижесінде жоғары диэлектрлік өтімділігі бар қатты төсеніштердегі антенналармен салыстырғанда сәулелендіргіштің сызықтық өлшемдерінің ұлғаюына алып келеді.

Стандартты коаксиалды тракт пен SMA-қосқыштың кедергісіне сәйкестендірілген $Z_0 = 50$ Ом сипаттамалық кедергіні қамтамасыз ету шарты бойынша қоректендіру микрожолақты желісінің ені $W_F$ (7)-(8) есептеледі. Қоректендіру желісінің тиімді өтімділігі $W_F/h$ қатынасына тәуелді болады: тар желілер ($W_F/h \leq 1$) және кең желілер ($W_F/h \leq 1$) үшін әртүрлі аппроксимациялық өрнектер қолданылады, бұл желі енін итерациялық нақтылау кезінде ескеріледі. Қоректендіру желісінің $L_F$ (9) ұзындығы қоздыру нүктесіндегі импеданстық сәйкестендіру шарты бойынша бағытталатын толқын ұзындығының $\lambda_g$ (10) төрттен біріне еселік етіп таңдалады.

### 2.2 Антенна сипаттамаларын бағалаудағы өлшемшарттар

Нақты конструкцияларды әзірлеу мен талдауға кіріспес бұрын, антеннаның жұмысқа қабілетті және практикалық қолдануға жарамды деп танылуы үшін қандай сандық өлшемшарттар бойынша бағаланатынын анықтау қажет. Осы жұмыста микрожолақты антеннаның негізгі сапа көрсеткіштері ретінде шағылу коэффициенті ($S_{11}$), кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті (КТТК) және пайдалы әсер коэффициенті (радиациялық тиімділік) қабылданды. Олардың шекті мәндері антенна техникасында жалпы қабылданған нормативтер негізінде белгіленеді [10, 18].

$S_{11}$ шағылу коэффициенті (кері шығындар) антеннаның кіріс кедергісінің қоректендіру трактының кедергісімен (50 Ом) сәйкессіздігі нәтижесінде антенна кірісінен шағылатын қуат үлесін сипаттайды және кернеу бойынша шағылу коэффициенті $\Gamma_{кіріс}$ арқылы келесідей анықталады:

$$S_{11} = 20lg\left|\Gamma_{\text{кіріс}}\right| \tag{13}$$

мұндағы $Г_{кіріс}$ – антенна кірісіндегі кернеу бойынша шағылу коэффициенті. Антенна жұмыс жиілігінде $S_{11} \leq -10$ dB шарты орындалған жағдайда сәйкестендірілген және қолдануға жарамды деп есептеледі. Бұл келтірілетін қуаттың 10 %-дан аспайтын бөлігі шағылатынын және қуаттың кемінде 90 %-ы антеннаға берілетінін білдіреді [18]. Аталған шек микротолқынды антенналық құрылғылар үшін сәйкестендірудің жалпы қабылданған инженерлік өлшемшарты болып табылады; осы жұмыста зерттелген барлық конфигурациялар үшін келтірілген $S_{11}$ мәндері дәл осы өлшемшарт бойынша бағаланады.

Кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті (КТТК) сәйкестендіру дәрежесін бағалаудың балама түрі болып табылады және шағылу коэффициентінің модулімен келесі қатынас арқылы байланысты:

$$\text{КТТК} = \frac{1+|\Г|}{1-|\Г|} \tag{14}$$

$S_{11} = -10\ dB$ мәніне $КТТК \approx 1{,}92$ сәйкес келеді. Осылайша, сәйкестендіру өлшемшартын баламалы түрде $1 \leq КТТК \leq 2$ шарты ретінде тұжырымдауға болады. Идеалды сәйкестендіруге (шағылудың толық болмауына) $КТТК = 1$ сәйкес келеді, ал $КТТК = 2$ мәні антеннаның практикалық жұмыс істеуі үшін шекті рұқсат етілетін мән болып табылады [10].

Антеннаның пайдалы әсер коэффициенті $\eta_{сәул}$ радиациялық тиімділікпен сипатталады және сәулелендіретін қуаттың оның кірісіне берілген қуатқа қатынасын білдіреді. Радиациялық тиімділік бағытталған әсер коэффициентін $D$ (сәулеленудің кеңістіктік шоғырлануын сипаттайды) және іске асырылған күшейту коэффициентін $G$ келесідей байланыстырады:

$$G = D \cdot \eta_{\text{сәул}} = D \cdot \frac{P_{\text{сәул}}}{P\text{бер}} \tag{15}$$

мұндағы $D$ – бағытталған әсер коэффициенті, $P_{сәул}$ – сәулеленген қуат, $P_{бер}$ – берілген қуат. (15)-қатынастан модельдеу нәтижелері бойынша радиациялық тиімділікті тексеру тәсілі шығады: $\eta_{сәул} = G/D$. Күшейту коэффициенті бағытталған әсер коэффициенті мен тиімділіктің көбейтіндісіне тең болуына байланысты дәл осы тиімділік конструкциядағы жылулық шығындардың (өткізгіштік және диэлектрлік шығындардың) деңгейін көрсетеді: $G$ мәні $D$ мәніне неғұрлым жақын болса, антеннаның ПӘК-і соғұрлым жоғары және өткізгіш қабат пен текстильді төсеніштегі шығындар соғұрлым аз болады. Диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсі жоғары текстильді төсеніштердегі антенналар үшін радиациялық тиімділіктің төмендеуі күтілетін құбылыс болып табылады және электродинамикалық модельдеу нәтижесінде алынған $G$ және $D$ мәндерін салыстыру арқылы бағаланады.

Одан басқа әзірленген конструкцияларды талдау кезінде олардың пайдалану жағдайларындағы жұмысқа қабілеттілігін толық сипаттауға мүмкіндік беретін қосымша сипаттамалар да қолданылды.

Жұмыс жиіліктерінің жолағы $S_{11} \leq -10$ dB сәйкестендіру шарты орындалатын үздіксіз интервал ретінде анықталды, ал салыстырмалы өткізу жолағы осы интервал ені мен орталық резонанстық жиіліктің қатынасы ретінде пайызбен өрнектелді. Антенналар үшін жұмыс жолағының ені жеке маңызға ие, өйткені конструкция иілген кезде және адам денесіне жақын орналастырылған жағдайда резонанстық жиілік ығысады; жолақ неғұрлым кең болса, осы ығысудың соғұрлым үлкен бөлігі сәйкестендіруді жоғалтпай өтеледі. Дәл осы себепті өткізу жолағын табиғи түрде кеңейтетін диэлектрлік өтімділігі төмен текстильді төсеніштерді қолдану осы жұмыста тек технологиялық емес, сонымен қатар функционалдық артықшылық ретінде қарастырылады.

Алға/артқа сәулелену қатынасы бағытталу диаграммасының максимум бағыты бойынша сәулелену деңгейінің қарама-қарсы бағыттағы сәулелену деңгейіне қатынасы ретінде анықталып, децибелмен өрнектелді. Антенна үшін бұл көрсеткіштің қос мәні бар: ол конструкцияның бағытталу қасиеттерін де, адам денесін кері бағыттағы сәулеленуден экрандау дәрежесін де сипаттайды, демек, меншікті жұтылу коэффициентінің деңгейімен жанама түрде байланысты. Күшейту коэффициенті жоғары Яги–Уда антеннасы үшін бұл көрсеткіш негізгі сипаттамалардың бірі болып табылады, ал антенна торы үшін оның рөлі негізінен тұтас жерге тұйықтау қабатының экрандау әсерін бағалаумен шектеледі. Жартылай қуат деңгейіне сәйкес келетін бағытталу диаграммасының негізгі жапырақшасының ені қуат ағынының тығыздығы максималды деңгейдің жартысына дейін, яғни 3 dB-ге төмендейтін екі бағыттың арасындағы бұрыш арқылы анықталды. Жартылай қуат деңгейіндегі сәуле ені антеннаның бұрыштық қамту аймағын сипаттайды. Негізгі жапырақша кең болса, құрылғы мен базалық түйіннің өзара орналасуы өзгергенде де байланыс сақталады. Жапырақша тар болғанда антеннаны қабылдағышқа қарай бағыттау керек, бірақ бұл жағдайда күшейту коэффициенті жоғары болғандықтан, байланыс қашықтығы артады. Сәуле ені мен күшейту коэффициенті арасындағы осы тәуелділік 5-тарауда екі антеннаны салыстырудың негізгі өлшемшарттарының бірі ретінде алынды.

Шағылу коэффициенті $S_{11}$ және КТТК тәжірибе жүзінде NanoVNA векторлық тізбек анализаторымен өлшеніп, модельдеу нәтижелерімен салыстырылды. Сәулелену диаграммасы, күшейту коэффициенті және радиациялық тиімділік тек CST Studio Suite бағдарламасында модельдеу арқылы анықталды. Оларды өлшеу үшін жаңғырықсыз камера керек, ал зерттеу кезінде мұндай камера қолжетімді болған жоқ.

Сол себепті модель эксперимент жүзінде тек $S_{11}$ бойынша тексерілді: шағылу коэффициенті Open–Short–Load калибрлеуінен кейін портативті NanoVNA векторлық тізбек анализаторымен өлшенді. Сәулелену сипаттамаларын өлшеу жұмыстың келесі кезеңінде жоспарланған.

Аталған өлшемшарттар бір-бірін толықтырады және оларды жеке-жеке емес, бірге қарастыру қажет. Антенна жақсы сәйкестендірілген болуы мүмкін, яғни шағылу коэффициенті өте төмен болады, бірақ берілген қуаттың едәуір бөлігі төсеніште немесе өткізгіште жылуға айналса, күшейту коэффициенті төмен болып қалады. Керісінше, бағыттылығы жоғары антенна нашар

сәйкестендірілсе, қуаттың бір бөлігі кіріске кері шағылады. Сондықтан киетін антеннаны бағалауда сәйкестендіру, бағыттылық және тиімділік бірге ескерілді.

Тәжірибелік бақылау үшін шағылу коэффициентін таңдау бірнеше себепке байланысты. Біріншіден, бұл параметр антеннаның резонанстық жиілігін, сәйкестендіру дәрежесін және өткізу жолағын бір өлшеу арқылы анықтауға мүмкіндік береді. Екіншіден, шағылу коэффициенті төсеніш параметрлерінің дәлдігіне және дайындау сапасына сезімтал: модель мен прототип арасындағы кез келген айырмашылық ең алдымен резонанстық жиіліктің ығысуы түрінде байқалады. Үшіншіден, мұндай өлшеуді портативті құралмен, арнайы камерасыз жүргізуге болады.

Өлшеу нәтижелерінің дәлдігіне бірқатар факторлар әсер етеді. Калибрлеу жазықтығы мен антенна кірісінің арасындағы коаксиалды кабель мен қосқыш қосымша фазалық ығысу және шамалы шығын енгізеді. Кабельдің орналасуы және оны қолмен ұстау антенна маңындағы өрісті өзгертуі мүмкін. Иілгіш текстильді антенна жазық күйде өлшенгенде оның беті толық тегіс болмауы да нәтижеге әсер етеді. Осы факторлардың ықпалын азайту үшін өлшеу алдында калибрлеу жүргізілді және барлық прототиптер бірдей жағдайда өлшенді.

***2 – бөлім бойынша қорытынды***

Екінші тарауды қорытындылай келе, екі элементті сызықтық антенна торы мен Яги–Уда антенналарына арналып, текстильді төсеніштегі микрожолақты антенналарды жобалау әдістемесі құрылғанын атап өтуге болады.

Сонымен қатар, қоректендіру үшін ойықтар арқылы кірістірілген (inset-fed) микрожолақты желі таңдалды. Ол тесік бұрғылауды және қабаттарды қиыстыруды талап етпейді, ал кіріс кедергісі ойық тереңдігін өзгерту арқылы 50 Ом-ға келтіріледі. Иілгіш мата конструкциясы үшін бұл қарапайым әрі сенімді шешім.

Сәулелендіргіштің ені мен ұзындығы, тиімді диэлектрлік өтімділік, қоректендіру желісі мен жерге тұйықтау қабатының өлшемдері классикалық аналитикалық өрнектермен есептелді. Алынған мәндер CST Studio Suite бағдарламасындағы параметрлік оңтайландыруда бастапқы шама ретінде пайдаланылды.

Антенна үш өлшемшарт бойынша бағаланды: $S_{11} \le -10$ dB, КТТК $\le 2$ және $\eta = G/D$ өрнегімен есептелетін радиациялық тиімділік. Модельде өткізгіштегі шығын ток өткізгіш матаның тиімді өткізгіштігі арқылы, төсеніштегі шығын tg $\delta$ арқылы ескерілді. Эксперимент жүзінде $S_{11}$ мен КТТК ғана тексерілді, күшейту коэффициенті мен тиімділік модельдеуден алынды. Жобалау үш кезеңнен тұрады (аналитикалық есептеу, CST Studio Suite бағдарламасында оңтайландыру, прототип дайындау) және екі антеннаға бірдей қолданылды. Әдістеме автордың [81, 82] жұмыстарындағы антенналарды жобалауда сыналған.

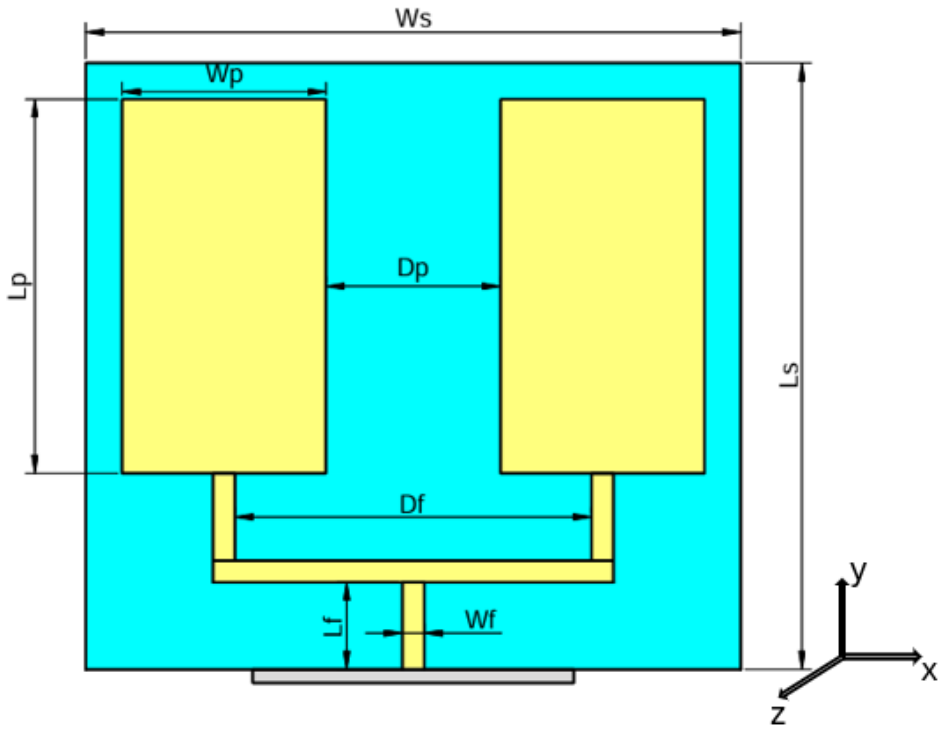
## 3 Текстильді төсеніштегі екі элементті сызықтық антенна торын әзірлеу және оңтайландыру

### 3.1 Антенна конструкциясы, геометриялық параметрлері және модельдеу нәтижелері

Жеке патчпен салыстырғанда күшейту коэффициентін арттыру үшін екі элементті сызықтық антенна торы таңдалды. Бұл ретте конструкция иілгіш әрі жұқа күйінде қалып, матаға кіріктірілуі керек. Әр сәулелендіргіштің бастапқы өлшемдері фетр, джинс матасы және полиэстер төсеніштері үшін микрожолақты антенналар теориясының (2)–(12) өрнектерімен есептелді.

Есептелген өлшемдер CST Studio Suite бағдарламасындағы параметрлік оңтайландыруға бастапқы шама ретінде берілді. Джинс матасындағы конструкцияда (2) өрнекпен табылған патч ені 53,7 мм болса, оңтайландырудан кейін 29 мм-ге дейін қысқарды, ал резонанстық ұзындық 46,9 мм-ден 48,02 мм-ге дейін өсті. Ені тарылған патчтарды бір-біріне жақынырақ қоюға болатындықтан, тордың жалпы өлшемі кішірейді. Кіріс кедергісі ойықтар арқылы кірістірілген қоректендіру (inset feed) арқылы сәйкестендірілді.

Оңтайландыру барысында резонанстық жиілікті негізінен патч ұзындығы $L$ анықтайтыны байқалды, ал $W$ ені кіріс кедергісіне, өткізу жолағына және радиациялық тиімділікке әсер етті. Фетр мен полиэстердегі торлар да осы ретпен оңтайландырылды. Үш төсеніштегі тордың соңғы өлшемдері 6-кестеде, оңтайландырылған конструкцияның сұлбасы 8-суретте берілген.




8 сурет – Оңтайландырылған 1×2 антенна торының геометриясы [81]

Ұсынылған конструкция – 1×2 сызықтық антенна торы, оның элементтері Т тәрізді қуат бөлгіші бар симметриялы корпоративтік желі арқылы қоректенеді.

Бөлгіштен әр сәулелендіргішке дейінгі желі ұзындығы бірдей, демек элементтер тең амплитудамен және бірдей фазамен ($\beta$ = 0) қозады. Мұндай қозуда сәулелену максимумы тор жазықтығына перпендикуляр бағытталады. Оңтайландыру нәтижесінде элементтер арасындағы *Dp* қашықтығы 23,94 мм болып анықталды. Бұл шамамен $0{,}2\lambda_0$-ге сәйкес келеді. Таңдалған қашықтық антенна өлшемдерін ықшам сақтауға мүмкіндік береді. Сонымен бірге элементтер арасындағы өзара байланыстың әсері ескерілді. Торцевтік сәулеленуге арналған антенна торларында сәулеленудің қажетті бағытын қалыптастыру үшін фазаның ілгері озуы қолданылуы мүмкін. Қарастырылып отырған конструкцияда екі элемент синфазалық түрде қоздырылады. Нәтижесінде сәулеленудің негізгі максимумы антенна жазықтығына нормаль бағытта орналасады. Бұл қасиет кең бағытталу диаграммасын қалыптастыруға мүмкіндік береді және конструкцияны денеден тыс (off-body) байланыс жүйелерінде қолдануға қолайлы етеді [81].

Екі элементті сызықтық антенна торының бағытталу қасиеттері жеке сәулелендіргіш элементтің бағытталу диаграммасы мен тор көбейткішінің көбейтіндісімен сипатталады (диаграммаларды көбейту принципі). $D_p$ қашықтықта орналасқан және фазалар айырымы $\beta$ болатын, амплитудалары тең токтармен қоздырылатын екі бірдей элементтен тұратын сызықтық тор үшін тор көбейткіші келесі өрнекпен анықталады:

$$AF = 2\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \tag{16}$$

мұндағы $\psi = k\cdot D_p \cdot \cos\varphi + \beta$ – фазалардың жалпыланған айырмасы, $k = 2\pi/\lambda_0$ – толқындық сан, $\varphi$ – антенна торының осінен бастап есептелетін бұрыш. Тордың нәтижелік бағытталу диаграммасы жеке элементтің бағытталу диаграммасы мен тор көбейткішінің көбейтіндісі түрінде анықталады:

$$F(\theta,\varphi) = F_{\text{эл}}(\theta,\varphi)\cdot AF(\theta,\varphi) \tag{17}$$

Қарастырылып отырған конструкцияда синфазалық қоздыру ($\beta$ = 0) жүзеге асырылған, бұл кезде тор көбейткішінің максимумы элементтердің орналасу сызығына нормаль бағытта ($\varphi$ = 90°) бағдарланады. Нәтижесінде бүйірлік сәулелену (broadside) типті бағытталу диаграммасы қалыптасады. Оңтайландырылған элементтер аралығы ($D_p$ = 23,94 мм патч жиектері арасындағы қашықтық, бұл олардың центрлері арасындағы шамамен $0{,}5\lambda_0$ қашықтыққа сәйкес келеді) бағытталу қасиеті мен өзара байланыстың деңгейі арасындағы ымыраны қамтамасыз етеді: қашықтықтың ұлғаюы күшейту коэффициентін арттырады, алайда элементтер центрлері арасындағы қашықтық $\lambda_0$ мәніне жақындаған кезде бағытталу диаграммасында жанама (дифракциялық) максимумдар пайда болады, ал қашықтықтың шамадан тыс азайтылуы элементтер арасындағы өзара байланысты күшейтіп, сәулелену тиімділігін төмендетеді.

Екі сәулелендіргіш элементтің қоздырылуы симметриялы Т-тәрізді қуат бөлгішке негізделген корпоративтік (параллель) қоректендіру сұлбасы арқылы

жүзеге асырылады. Мұндай қоректендіру сұлбасы қуатты екі элемент арасында тең дәрежеде бөлуге және олардың синфазалы жұмыс істеуін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Антенна торының кіріс кедергісін стандартты 50 Ом трактімен сәйкестендіру үшін ширек толқынды кедергі трансформаторы қолданылды. Оның сипаттамалық кедергісі сәйкестендірілетін кедергілердің геометриялық ортасы ретінде анықталады:

$$Z_{\text{т}} = \sqrt{Z_{\text{кіріс}} \cdot Z_{\text{н}}} \tag{18}$$

мұндағы $Z_{кіріс}$ – сәйкестендірілетін кіріс кедергісі, $Z_н$ – жүктеме кедергісі (қоректендіру тармақтарының параллель қосылуының кедергісі). Бөлгіш топологиясының симметриялы болуы және бөліну нүктесінен әрбір сәулелендіргіш элементке дейінгі қоректендіру тармақтарының ұзындықтарының бірдей болуы қоздырушы токтардың амплитудалары мен фазаларының теңдігін қамтамасыз етеді. Бұл симметриялы бүйірлік сәулелену диаграммасын қалыптастырудың қажетті шарты болып табылады. Антенна торының жерге тұйықтау қабаты жеке элементтің жерге тұйықтау қабатымен салыстырғанда (6-кесте) екі сәулелендіргіш элементті орналастыруға және корпоративтік қоректендіру желісін жүргізуге қажетті өлшемдерге дейін ұлғайтылды.

Теориялық тұрғыдан синфазалық қоздырылуы бар $N$ бірдей элементтен тұратын сызықтық тордың күшейту коэффициенті жеке элементтің күшейту коэффициентімен жуық түрде мына қатынас арқылы байланысты:

$$G_{\text{реш}} \approx G_{\text{эл}} + 10\ lg\ N \tag{19}$$

Осыдан екі элементті тор ($N = 2$) үшін бағыттылық коэффициенті шамамен 3 dB-ге өсуі тиіс екені шығады. Күшейту коэффициентінің нақты өсімі бұдан аз, себебі қуаттың бір бөлігі корпоративтік желідегі омдық шығынға, элементтердің өзара байланысына, сондай-ақ текстильді төсеніш пен өткізгіш қабаттағы шығындарға жұмсалады. Осы шығындардың салдарынан радиациялық тиімділік 16–27 % аралығында (7-кесте), ал зерттелген конфигурациялардың күшейту коэффициенті 0,86–3,33 dBi болды. Бұл мәндер 4-кестеде келтірілген текстильді антенна торларының көрсеткіштерімен бір деңгейде.

Параметрлік оңтайландыру кезінде тордың параметрлері тұрақты және айнымалы болып бөлінді. Тұрақты параметрлерге жұмыс жиілігі $f_0$ = 2,45 ГГц, SMA-қосқышы бар коаксиалды трактімен сәйкестендіруге қажетті толқындық кедергі $Z_0$ = 50 Ом, сондай-ақ төсеніш материалымен анықталатын диэлектрлік өтімділік $\varepsilon_r$ (1,45–1,9) және төсеніш қалыңдығы $h$ (фетр мен джинс матасы үшін 2,0 мм, полиэстер үшін 0,48 мм) жатады. Қоректендіру түрі ойық арқылы қосылатын (inset-fed) микрожолақты желілік қоректендіру ретінде қабылданды.

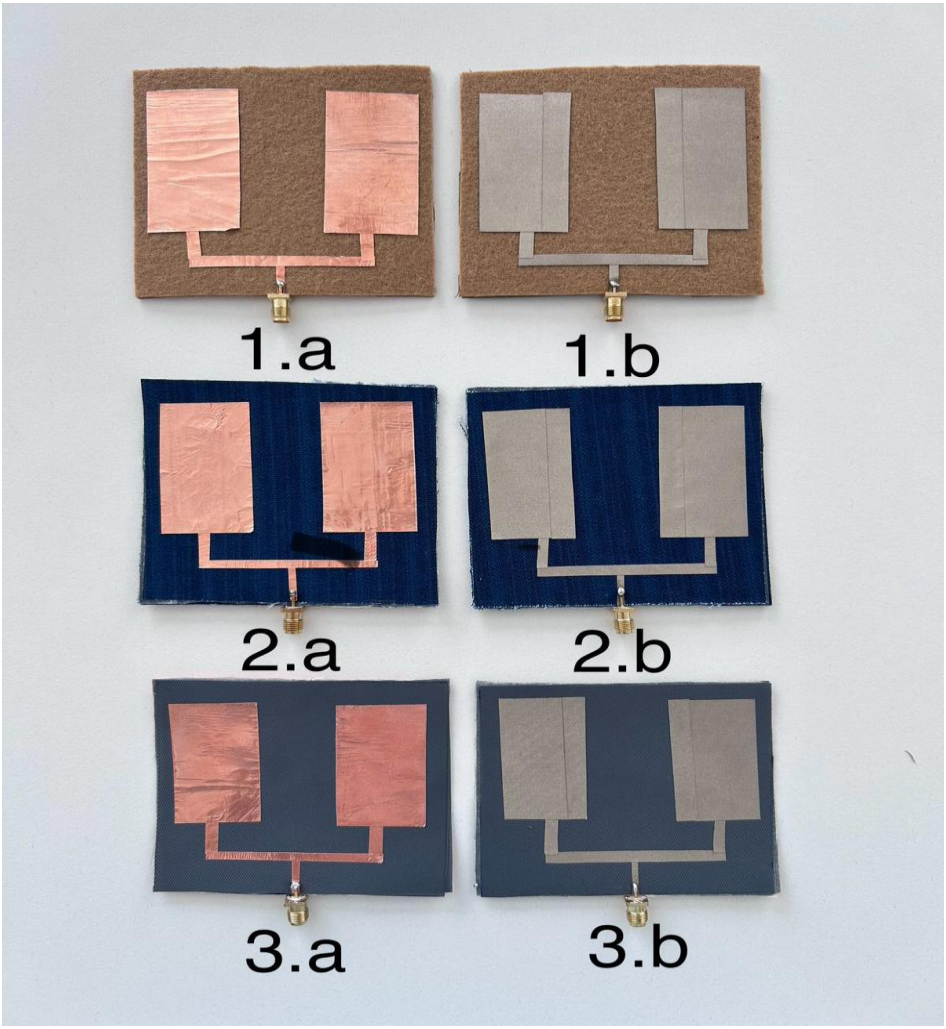
Өзгермелі параметрлер қабылданған сәйкестендіру және тиімділік өлшемшарттарына қол жеткізу үшін CST Studio Suite бағдарламалық кешенінде оңтайландыру барысында таңдалады. Оларға патч ені $W_p$ (кіріс кедергісін, жұмыс жолағын және сәулелену тиімділігін басқарады), патч ұзындығы $L_p$ (2,45

ГГц резонанстық жиілігін дәл баптайды), ойықтың (inset) тереңдігі (кіріс кедергісін 50 Ом-ға дейін сәйкестендіреді) және сәулелендіргіш элементтер арасындағы $D_p$ қашықтығы (конструкцияның ықшамдылығы мен өзара байланыстың арасындағы теңгерімді қамтамасыз етеді, оңтайландырылған мәні *23,94 мм* ≈ *0,2λ₀*) жатады.

6 кесте – Үш негіз үшін антенна торының есептік геометриясы [81]

| Параметр, мм | Фетр | Джинс | Полиэстер |
|---|---|---|---|
| $W_p$ (патчтың ені) | 30 | 29 | 28 |
| $L_p$ (патчтың ұзындығы) | 51,5 | 48,02 | 44,33 |
| $W_f$ (фидердің ені) | 3 | 3 | 3 |
| $L_f$ (фидердің ұзындығы) | 12 | 12 | 12 |
| $W_s$ (төсеніштің ені) | 83,5 | 80,02 | 76,33 |
| $L_s$ (төсеніштің ұзындығы) | 89,94 | 87,94 | 85,94 |
| $D_f$ (фидерлер арасындағы қашықтық) | 49,94 | 48,94 | 46,94 |
| $D_p$ (патчтар арасындағы қашықтық) | 23,94 | 23,94 | 23,94 |

Антенна торының прототиптері үш текстильді төсеніштің (фетр, джинс мата, полиэстер) және екі ток өткізгіш материалдың (мыс таспасы, ток өткізгіш мата) үйлесіміне сәйкес келетін алты конструкциялық нұсқада дайындалды: A конфигурациясы фетр + мыс таспасы; B конфигурациясы фетр + ток өткізгіш мата; C конфигурациясы джинс мата + мыс таспасы; D конфигурациясы джинс мата + ток өткізгіш мата; E конфигурациясы – полиэстер + мыс таспасы; F конфигурациясы – полиэстер + ток өткізгіш мата. Дайындалған барлық алты прототиптің сыртқы көрінісі 9 суретте көрсетілген.




9 сурет – Дайындалған антенна прототиптері: 1.a) мыс таспасы бар фетр төсеніштегі 1×2 антенна торы; 1.b) ток өткізгіш матасы бар фетр төсеніштегі антенна; 2.a) мыс таспасы бар джинс мата төсеніштегі антенна; 2.b) ток өткізгіш матасы бар джинс мата төсеніштегі антенна; 3.a) мыс таспасы бар полиэстер төсеніштегі антенна; 3.b) ток өткізгіш матасы бар полиэстер төсеніштегі антенна [81]

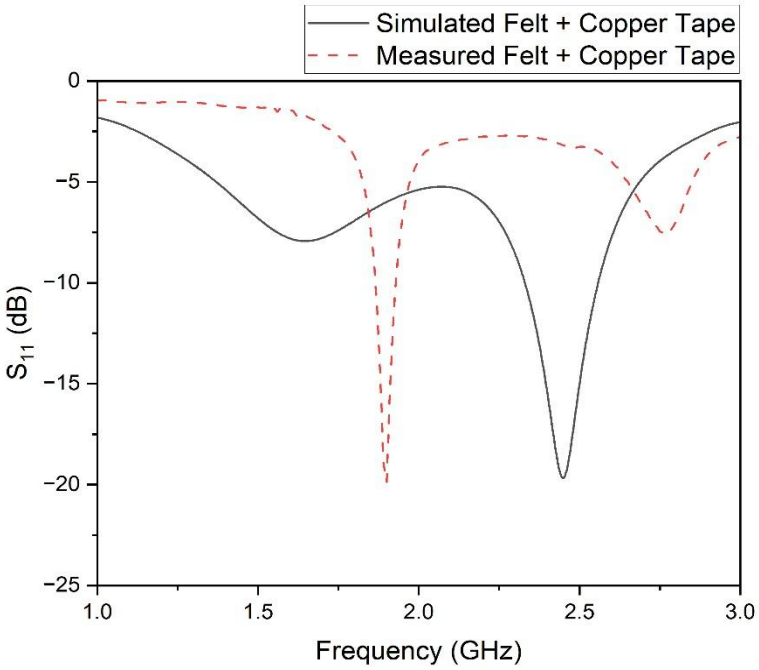
Дайындалған прототиптердің эксперименттік верификациясы портативті векторлық тізбек анализаторы (NanoVNA) көмегімен $S_{11}$ шағылу коэффициентін өлшеу әдісі арқылы жүргізілді. Өлшеулер алдында аспап жұмыс жиіліктері диапазонында «ашық тізбек — қысқа тұйықталу — сәйкестендірілген жүктеме» (Open–Short–Load) сұлбасы бойынша стандартты калибрлеуден өткізілді, содан кейін антенна SMA-қосқышы бар коаксиалды тракт арқылы өлшеу портына жалғанды. $S_{11}$ шағылу коэффициенті 2,45 ГГц резонанстық жиілігін қамтитын жиілік диапазонында өлшенді. Алынған нәтижелер әрбір прототиптің резонанстық жиілігін, сәйкестендіру тереңдігін және өткізу жолағын анықтауға, сондай-ақ кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициентін (КТТК) есептеуге мүмкіндік берді.

Антенна торының сәулелену диаграммасы, күшейту коэффициенті және радиациялық тиімділігі 2.1-бөлімде сипатталғандай CST Studio Suite

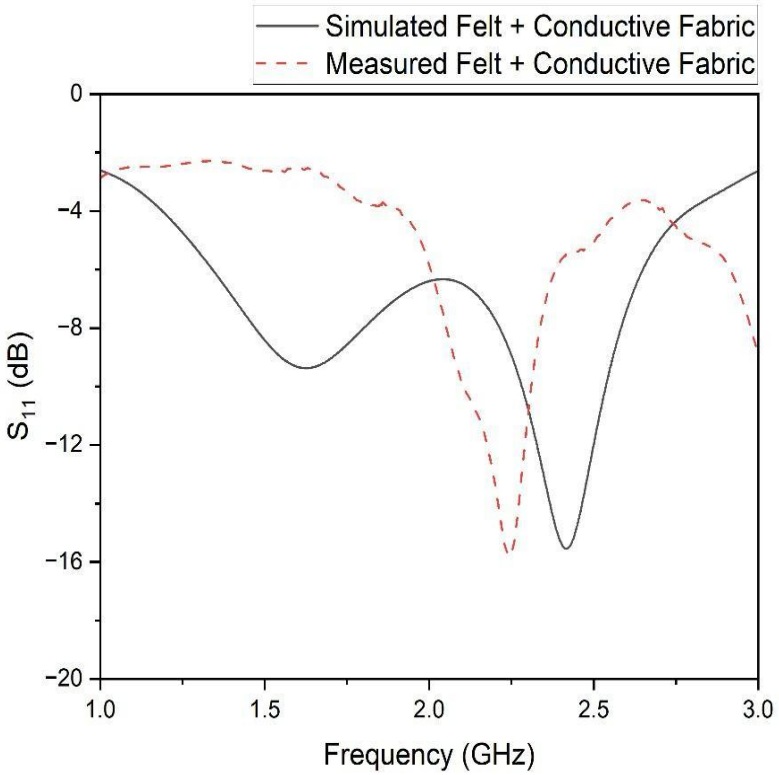
бағдарламасындағы модельдеу арқылы анықталды, ал тәжірибе жүзінде тек $S_{11}$ өлшенді. Алты конфигурацияның $S_{11}$ коэффициентінің жиілікке тәуелділігінің модельдеу және өлшеу нәтижелері 10–15 суреттерде келтірілген. Өлшенген өткізу жолағы $S_{11} \leq -10$ dB деңгейінде 200 МГц-тен асады [81].

Модельдеу мен өлшеу нәтижелері арасындағы айырмашылықтың бірнеше себебі бар. Бірінші және ең маңызды себеп – прототиптерді қолмен дайындау кезіндегі технологиялық ауытқулар. Ток өткізгіш мата мен мыс таспасын кесу қолмен жүргізілгендіктен, сәулелендіргіш элементтер мен қоректендіру желісінің сызықтық өлшемдеріндегі ауытқу бірнеше ондық миллиметрге дейін жетті. Жұмыс толқын ұзындығы шамамен 122 мм болған жағдайда мұндай ауытқу резонатордың электрлік ұзындығына айтарлықтай әсер етеді. Екінші себеп – текстильді төсеніштің қалыңдығының біркелкі болмауы. Тоқылған және тоқылмаған материалдар айқын кеуектілікке ие болғандықтан, үлгінің әртүрлі бөліктерінде жергілікті қалыңдық және соған сәйкес негіздің тиімді диэлектрлік өтімділігі өзгеруі мүмкін. Үшінші себеп – коаксиалды қосқыш жалғанған жердегі контакт сапасы. Текстильді материалдарды дәнекерлеу мүмкін болмағандықтан, қосылыс ток өткізгіш желімдік құрамды пайдалана отырып, механикалық қысу арқылы орындалды. Оның өтпелі кедергісі әрбір үлгіде дәл қайталанбайды және дискретті порттың идеалдандырылған есептік моделінде ескерілмейді. Осы жағдай жұқа полиэстер негізіндегі конфигурациялар үшін тіркелген ең үлкен алшақтықты түсіндіреді, себебі қалыңдығы 0,48 мм болатын мұндай негізде өтпелі кедергі мен қысу күшінің кіріс импедансына әсері барынша айқын байқалады.

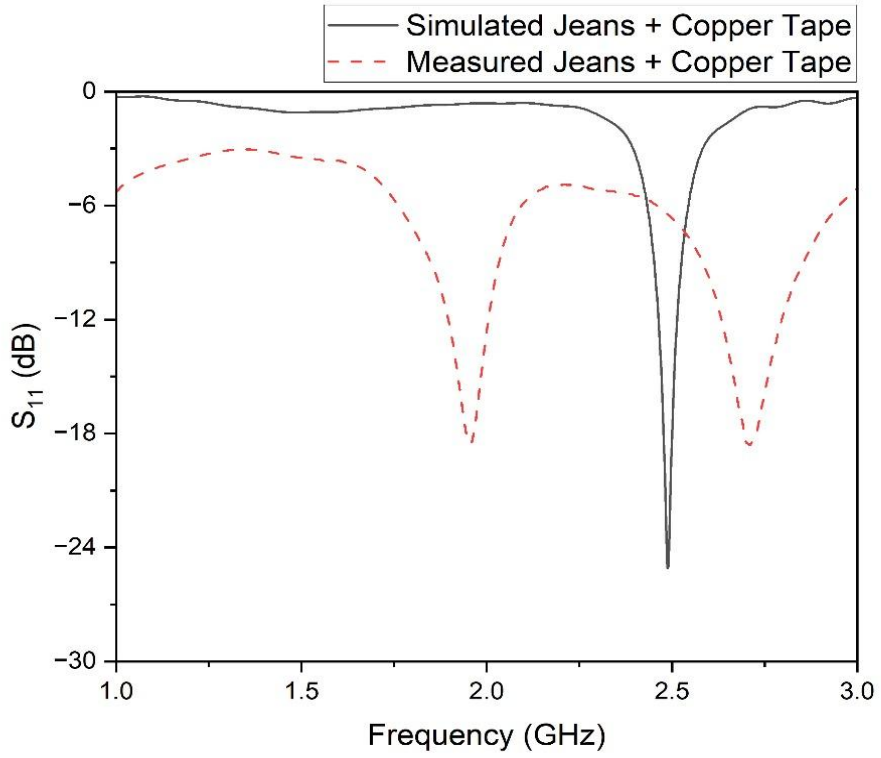
Соңында аспаптық құрамдасты да ескеру қажет: қолданылған портативті векторлық тізбек анализаторы «ашық тізбек – қысқа тұйықталу – сәйкестендірілген жүктеме» сұлбасы бойынша калибрленгеннен кейін шағылу коэффициентінің модулін резонанстық жиілікті анықтау және сәйкестендіру тереңдігін бағалау үшін жеткілікті дәлдікпен өлшеуді қамтамасыз етеді. Алайда терең минимумдарды өлшеу кезінде ол зертханалық деңгейдегі анализаторларға қарағанда төмен дәлдікке ие, өйткені мұндай жағдайда аспаптық шу өлшенетін шамамен шамалас деңгейге жетуі мүмкін. Осыған байланысты осы жұмыста есептік және өлшенген мәндерді салыстыру резонанстық жиіліктің орналасуы және $S_{11} \leq -10\ dB$ өлшемшартының орындалу фактісі бойынша жүргізіледі, ал шағылу коэффициентінің терең минимумдарының абсолюттік мәндері бағалау сипатында қарастырылады.



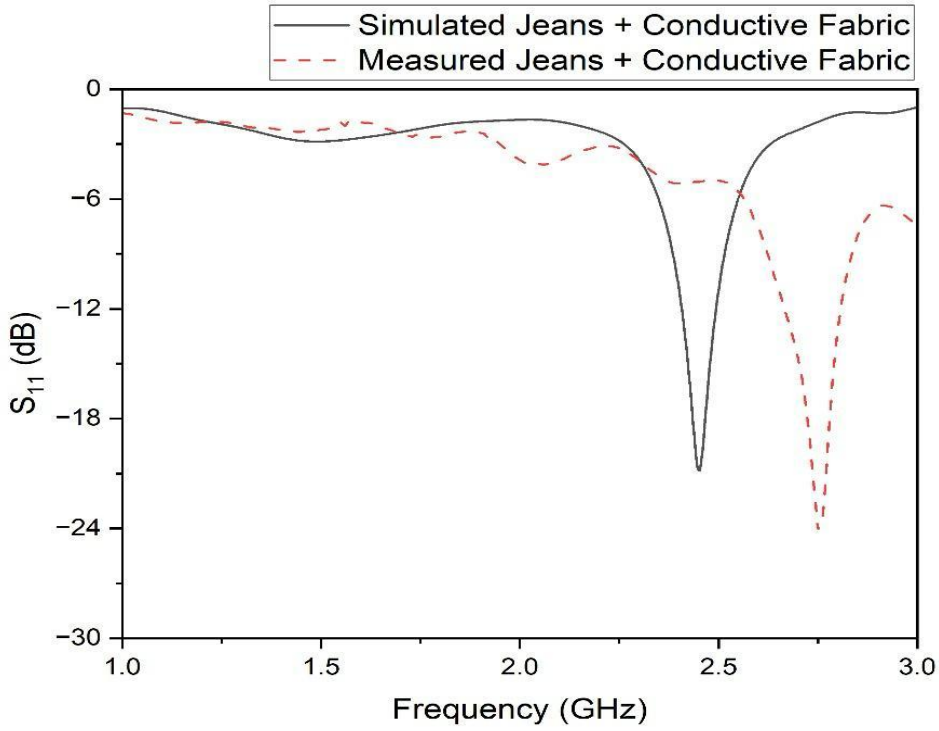

10 сурет – мыс таспасы бар фетр төсеніштегі 1×2 антенна торының есептік және эксперименттік $S_{11}$ коэффициенті [81]



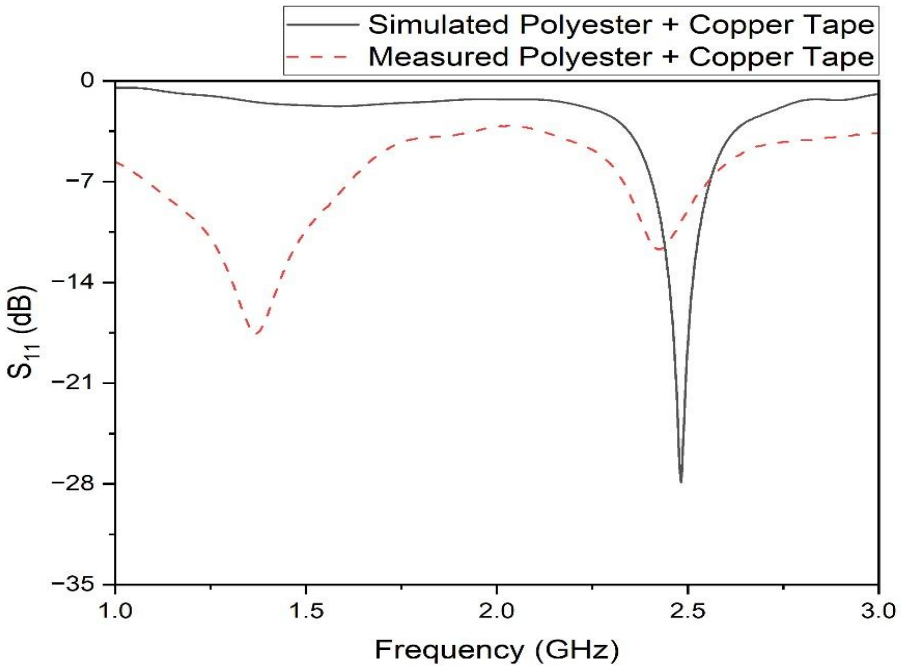

11 сурет – ток өткізгіш матасы бар фетр төсеніштегі 1×2 антенна торының есептік және эксперименттік $S_{11}$ коэффициенті [81]



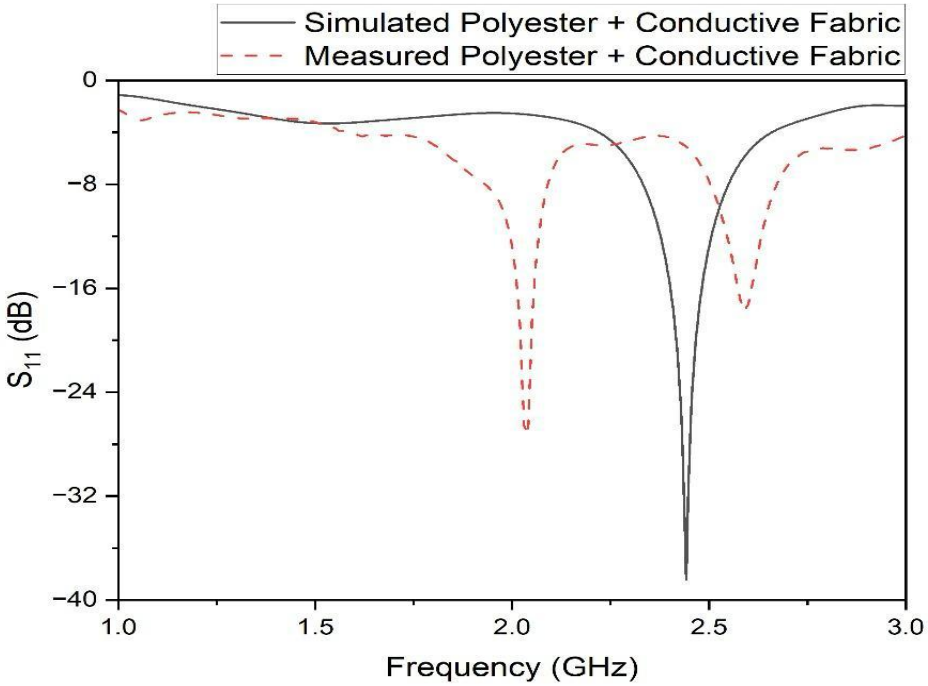

12 сурет – мыс таспасы бар джинс мата төсеніштегі 1×2 антенна торының есептік және эксперименттік $S_{11}$ коэффициенті [81]




13 сурет – ток өткізгіш матасы бар джинс мата төсеніштегі 1×2 антенна торының есептік және эксперименттік $S_{11}$ коэффициенті [81]




14 сурет – мыс таспасы бар полиэстер төсеніштегі 1×2 антенна торының есептік және эксперименттік $S_{11}$ коэффициенті [81]

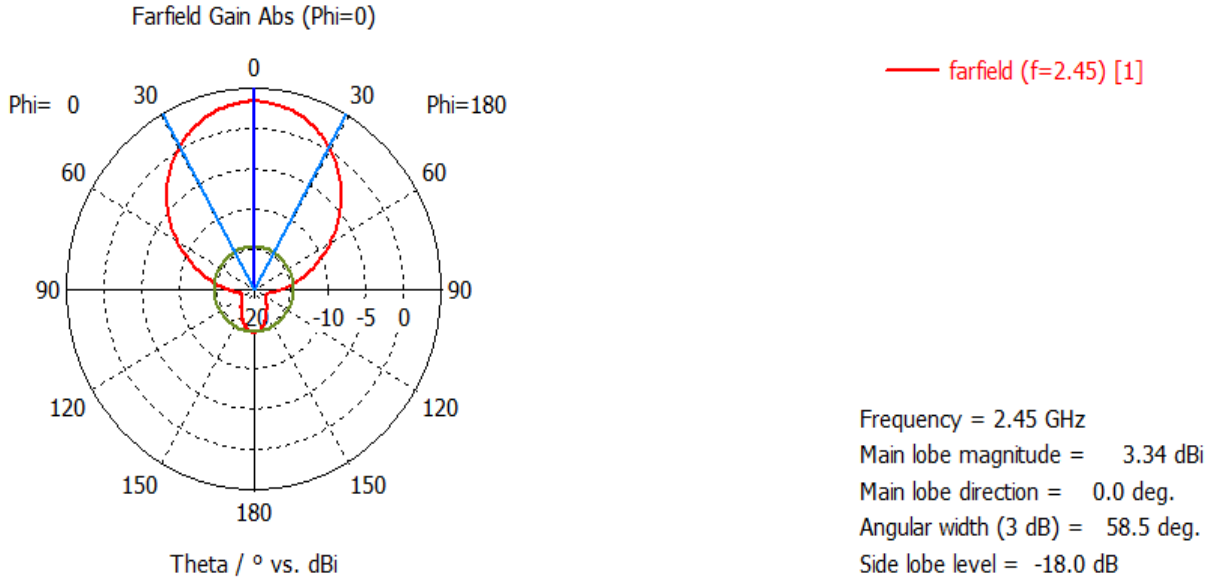



15 сурет – ток өткізгіш матасы бар полиэстер төсеніштегі 1×2 антенна торының есептік және эксперименттік $S_{11}$ коэффициенті [81]

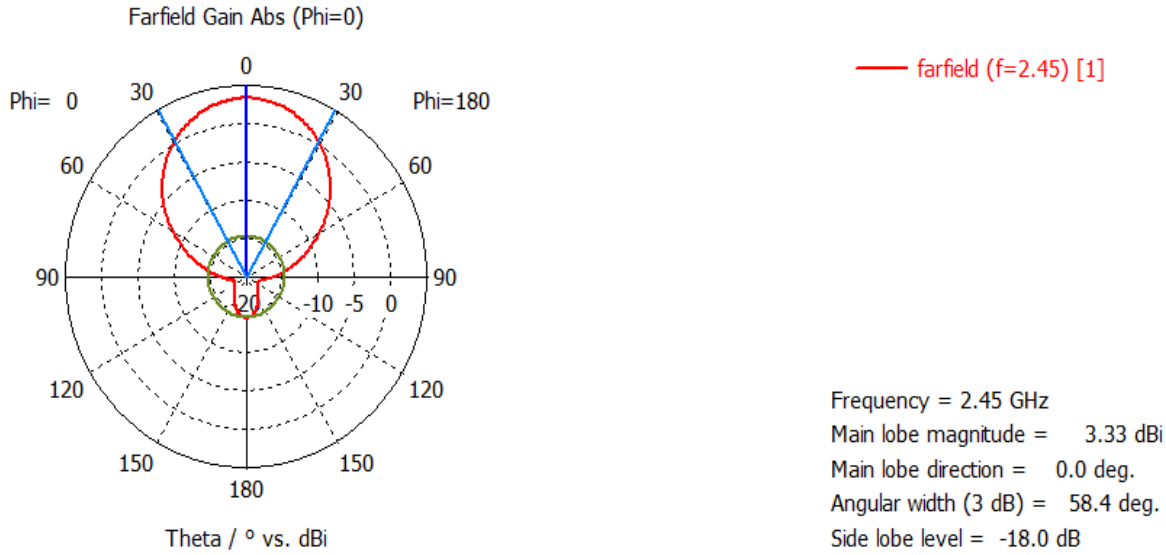
Барлық алты зерттелген конфигурация үшін 2,4–2,5 ГГц мақсатты диапазонындағы $S_{11}$ шағылу коэффициентін модельдеу және эксперименттік верификациялау нәтижелері 7-кестеде келтірілген. Қабылданған сәйкестендіру өлшемшартына сәйкес ($S_{11} \leq -10$ *dB*, бұл *КТТК* $\leq 2$ шартына баламалы; (13)-(14)-қатынастарды қараңыз), егер 2,45 ГГц жұмыс жиілігінде шағылу

коэффициентінің мәні −10 dB аспаса, конструкция жұмысқа жарамды деп есептеледі.

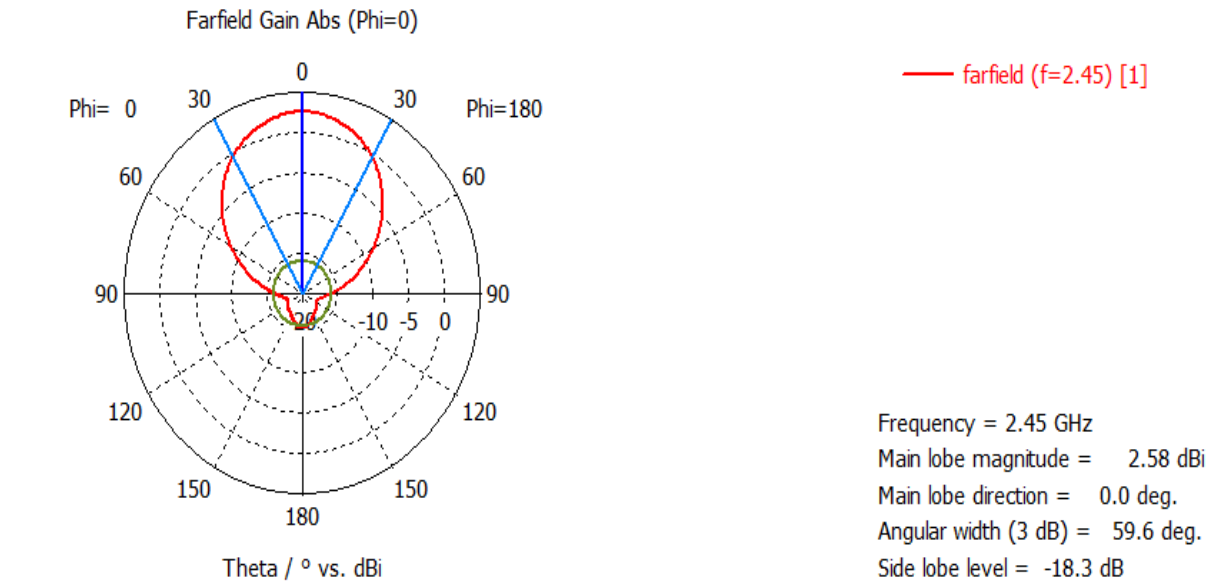
2,45 ГГц жиілігінде барлық алты конфигурация үшін модельдеу арқылы алынған бағытталу диаграммалары 16-21 суреттерде көрсетілген.



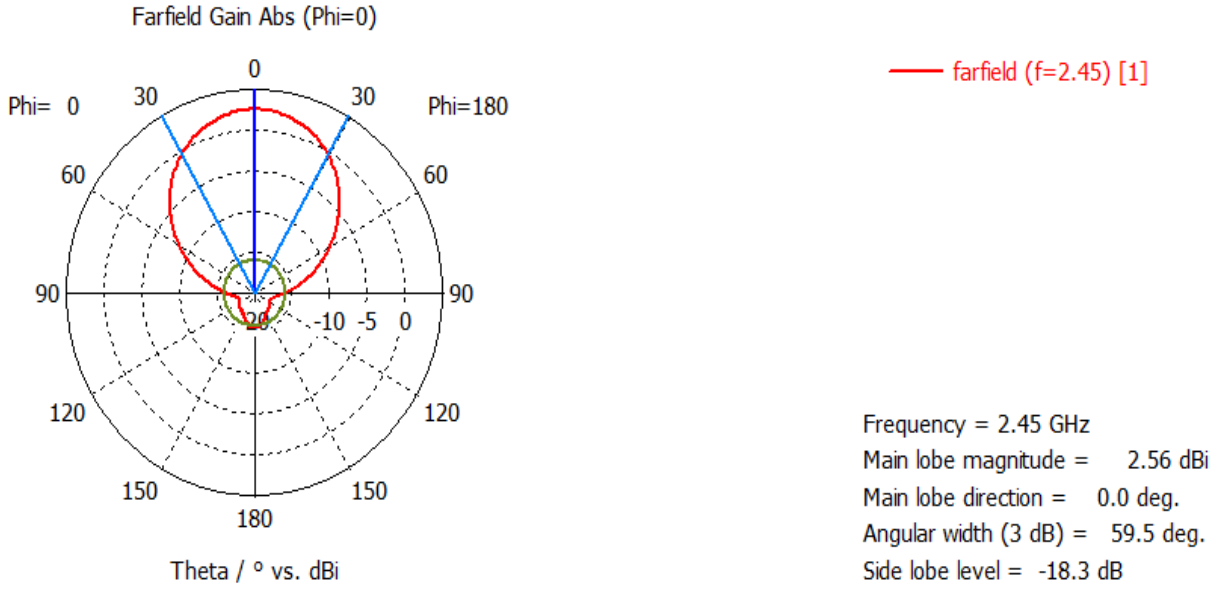

16 сурет – Мыс таспасы өткізгіш материал ретінде қолданылған фетр негіздегі 1×2 антенна торының бағытталу диаграммасы [81]



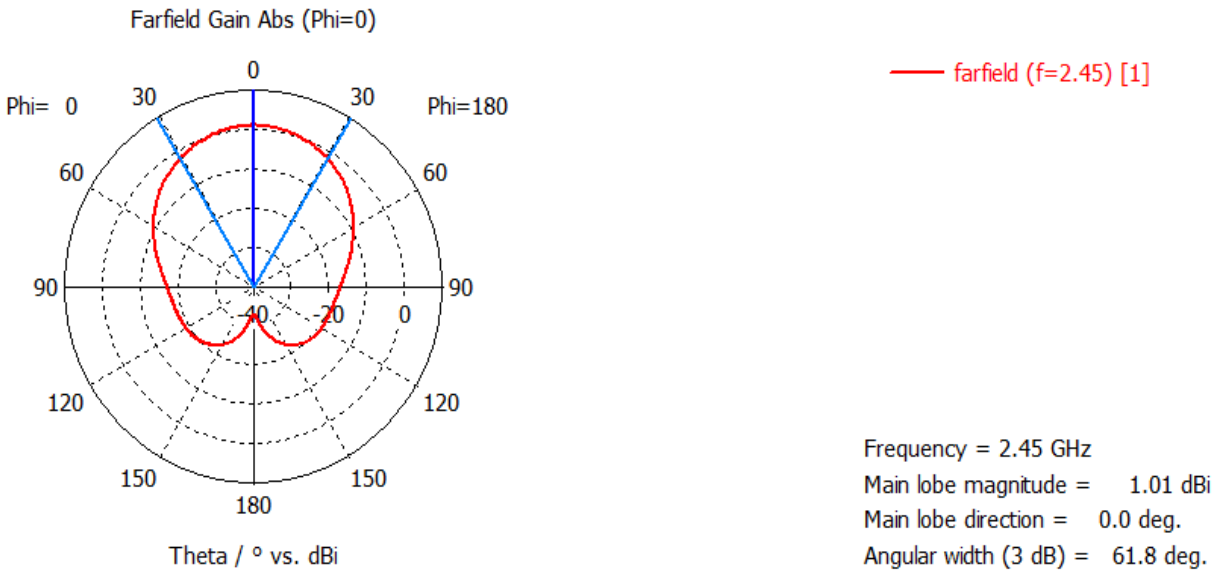

17 сурет – Ток өткізгіш мата өткізгіш материал ретінде қолданылған фетр негіздегі 1×2 антенна торының бағытталу диаграммасы [81]



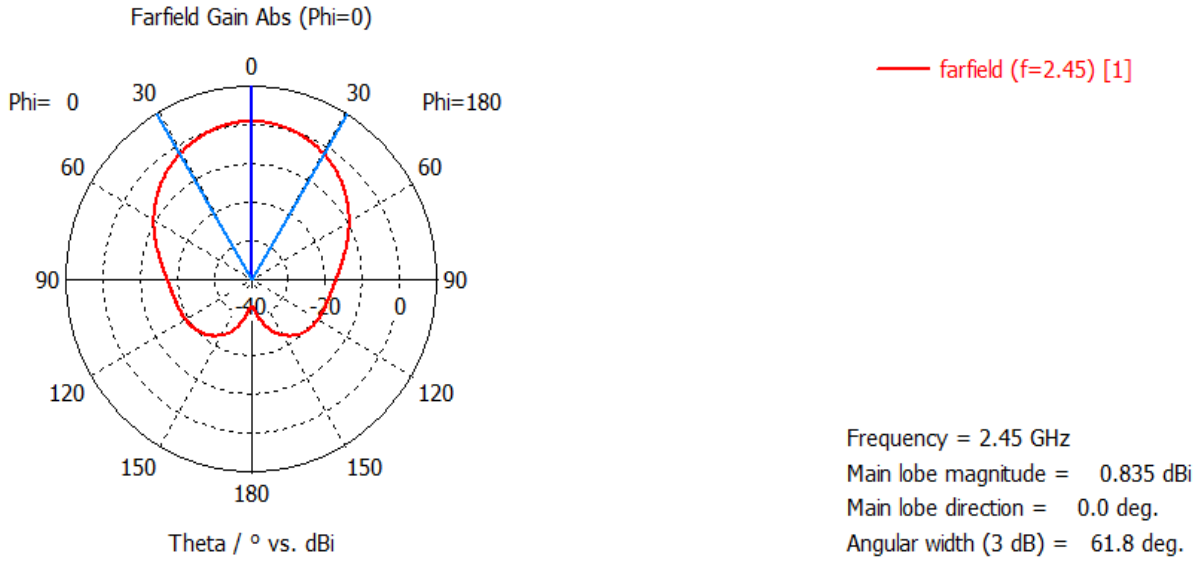

18 сурет – Мыс таспасы өткізгіш материал ретінде қолданылған джинс мата негіздегі 1×2 антенна торының бағытталу диаграммасы [81]




19 сурет – Ток өткізгіш мата өткізгіш материал ретінде қолданылған джинс мата негіздегі 1×2 антенна торының бағытталу диаграммасы [81]




20 сурет – Мыс таспасы өткізгіш материал ретінде қолданылған полиэстер негіздегі 1×2 антенна торының бағытталу диаграммасы [81]




21 сурет – Ток өткізгіш мата өткізгіш материал ретінде қолданылған полиэстер негіздегі 1×2 антенна торының бағытталу диаграммасы [81]

7 кесте – Антенна торының алты конфигурациясы үшін электродинамикалық сипаттамалар нәтижелері [81]

| Конф. | Төсеніш | Өткізгіш | $S_{11}$ модел., dB | $S_{11}$ өлш., dB | КТТК | КК, dBi | Бағыт., dBi | ПӘК, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | Фетр | Мыс таспа | –20 | –7 | 1,22 | 3,23 | 9,04 | 26,3 |
| B | Фетр | Ток өткізгіш мата | –16 | –16 | 1,38 | 3,33 | 9,06 | 26,7 |
| C | Джинс | Мыс таспа | –25 | –18 | 1,12 | 2,58 | 8,92 | 23,2 |
| D | Джинс | Ток өткізгіш мата | –25 | –25 | 1,12 | 2,56 | 8,92 | 23,1 |
| E | Полиэстер | Мыс таспа | –28 | –28 | 1,08 | 1,04 | 8,83 | 16,6 |
| F | Полиэстер | Ток өткізгіш мата | –38 | –16 | 1,03 | 0,86 | 8,73 | 16,45 |

Эксперимент нәтижелері бойынша 7-кестеде көрсетілгендей, ең жақсы сәйкестендіру мыс таспасы бар полиэстер негізіндегі конфигурацияда байқалды ($S_{11}$ = –28 dB), ал сипаттамалардың ең жақсы теңгерімін джинс мата мен ток өткізгіш мата негізіндегі конфигурация берді ($S_{11}$ = –25 dB). Өз кезегінде, ток өткізгіш мата қолданылған полиэстер негізіндегі конфигурация модельдеу (–38 dB) және эксперимент (–16 dB) нәтижелері арасындағы ең үлкен алшақтықты көрсетті. Бұны қалыңдығы 0,48 мм болатын жұқа полиэстер негіздің прототиптерді қолмен дайындау кезіндегі технологиялық шектеулерге сезімталдығымен байланыстыруға болады.

Фетр негізіндегі конфигурациялар сәулеленудің ең жоғары тиімділігін (26,3-26,7 %) қамтамасыз етсе, полиэстер негізіндегі конфигурациялар диэлектрлік шығындардың жоғары болуы және негіз қалыңдығының аздығына байланысты ең төмен тиімділікті (16,45-16,6 %) көрсетеді. Осылайша, күшейту коэффициенті мен радиациялық тиімділік негіз материалына байланысты айтарлықтай өзгеретіндігінін байқауға болады.

Айта кетерлігі, әдебиеттерде ұсынылған жекелеген конструкциялар күшейту коэффициентінің анағұрлым жоғары мәндерін көрсетеді, алайда оған өлшемі үлкенірек (2×2) антенна торларын немесе күрделірек құрылымдарды қолдану есебінен қол жеткізіледі. Ұсынылған конструкция жақсы механикалық иілгіштігі, төмен профильділігі және жүйелерге кіріктіруге жарамдылығы сақталған қарапайым бір қабатты текстильді архитектураны қамтамасыз етеді. Сонымен қатар ол ақылды қала IoT-жүйелеріндегі жақын қашықтықтағы сымсыз байланыс міндеттері үшін жеткілікті күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді [81].

Алты конфигурацияның нәтижелерін салыстыру төсеніш пен өткізгіштің антенна сипаттамаларына әсері әртүрлі екенін көрсетеді. Бір төсеніште мыс таспаны ток өткізгіш матамен ауыстырғанда бағыттылық та, күшейту коэффициенті де іс жүзінде өзгермейді. Ал өткізгіш материалы бірдей болып, төсеніш ауыстырылғанда күшейту коэффициенті мен тиімділік айтарлықтай өзгереді. Бұл нәтиженің физикалық түсіндірмесі мынада: жоғары жиілікте ток өткізгіштің бетіне жақын жұқа қабатта ағады, ал екі өткізгіш материалдың да қалыңдығы осы қабаттан жеткілікті үлкен. Сондықтан өткізгіштегі шығын жалпы шығынның шағын бөлігін құрайды, ал негізгі шығын төсеніште, яғни диэлектриктегі электр өрісі шоғырланған аймақта пайда болады. Микрожолақты антеннада өрістің басым бөлігі сәулелендіргіш пен жерге тұйықтау қабаты арасындағы төсеніште жинақталатыны осы тұжырымды растайды.

Модельдеу мен өлшеу нәтижелерінің арасындағы айырмашылықтарды бірнеше факторлармен түсіндіруге болады. Біріншіден, модельге енгізілген төсеніш параметрлері нақты маталардың қасиеттерін дәл қайталамайды. Екіншіден, өткізгішті матаға бекіту үшін қолданылған жабысқақ қабат модельде ескерілмеген, ал оның өзінің диэлектрлік қасиеттері бар. Үшіншіден, элементтерді қолмен қию модельдегі өлшемдерден шамалы ауытқуларға әкеледі. Төртіншіден, SMA-қосқышты дәнекерлеу немесе бекіту орны модельдегі порттан өзгеше болады. Бесіншіден, матаның қалыңдығы дайындау кезінде қысылуы мүмкін. Бұл факторлардың әрқайсысы жеке алғанда аз әсер етеді, бірақ бірге алғанда резонанстық жиіліктің және сәйкестендіру деңгейінің айтарлықтай ауытқуын тудыруы мүмкін. Атап айтқанда, мыс таспасы бар фетр конфигурациясында өлшенген сәйкестендірудің нашарлауы өткізгішті жабыстыру сапасымен және қалың фетрдің қысылуымен байланысты болуы ықтимал.

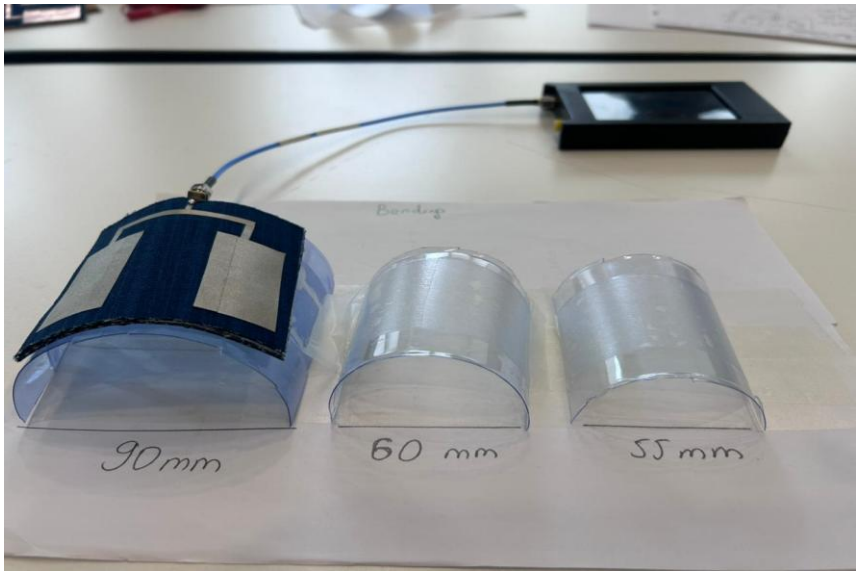
D конфигурациясын (ток өткізгіш матасы бар джинс) әрі қарай зерттеуге таңдау тек бір көрсеткішке емес, бірнеше факторлардың үйлесіміне негізделді. Бұл конфигурация модельде де, өлшеуде де жақсы сәйкестендіру көрсетті, оның күшейту коэффициенті фетр конфигурацияларына жақын, ал толық текстильді құрылымы иілгіштік пен киімге біріктіру тұрғысынан артықшылық береді. Джинс матасы киім өндірісінде кең таралған, берік және пішінін жақсы сақтайды, сондықтан ол практикалық киетін құрылғыға арналған төсеніш ретінде қолайлы.

### 3.2 Антеннаның механикалық деформацияларға төзімділігін зерттеу

Жазық (деформацияланбаған) күйде алынған нәтижелер негізінде иілуге тұрақтылықты одан әрі эксперименттік зерттеу үшін барлық алты зерттелген конфигурацияның ішінде импеданс тұрақтылығы, күшейту коэффициенті және механикалық иілгіштік көрсеткіштерінің ең теңгерімді үйлесімін көрсеткен D конфигурациясы (ток өткізгіш матасы бар джинс мата) таңдалды [81].

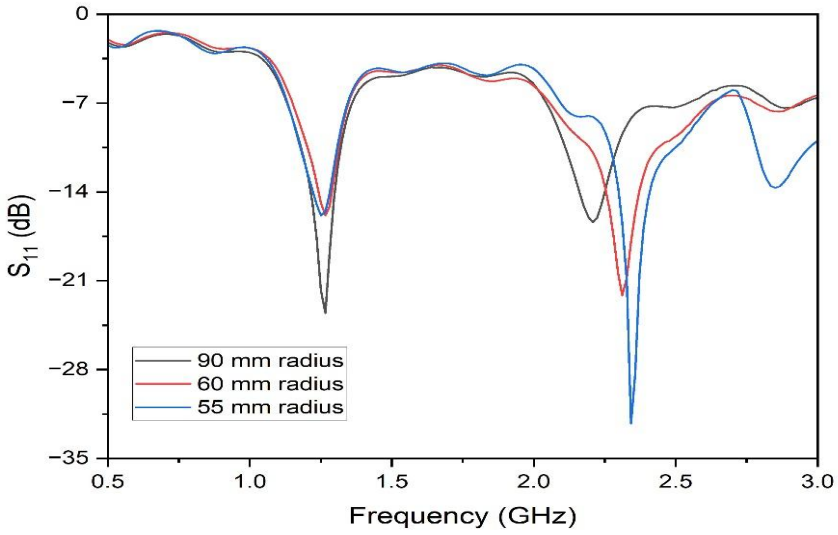
Ток өткізгіш матасы бар джинс мата негізінде дайындалған антенна торының $S_{11}$ шағылу коэффициенті жазық күйде, сондай-ақ қисықтық радиустары 55 мм, 60 мм және 90 мм болатын цилиндрлік беттерге иілген кезде

өлшенді. Әртүрлі иілу жағдайларындағы антеннаның сыртқы көрінісі 22-суретте көрсетілген.




22 сурет – Антенна торының иілу сценарийлері (радиустары 55, 60, 90 мм) [81]

23 суретте зерттелген үш иілу радиусы жағдайында өлшенген $S_{11}$ шағылу коэффициентінің жиілікке тәуелділігі көрсетілген.




23 сурет – Үш түрлі иілу радиусында: 55, 60 және 90 мм жағдайларында сыналған 1×2 антенна торының (D конфигурациясы) өлшенген $S_{11}$ коэффициенті [81]

Әрбір зерттелген иілу радиусы үшін $S_{11}$ шағылу коэффициенті мен антеннаның резонанстық жиілігінің өлшеу нәтижелері 8-кестеде көрсетілген.

8 кесте – D конфигурациясының иілу нәтижелері [81]

| Иілу радиусы, мм | Резонанстық жиілік, ГГц | Жиіліктің ығысуы, МГц | Салыстырмалы ығысу, % |
|---|---|---|---|
| Жазық күй | 2,47 | 0 | 0 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 90 | 2,21 | –260 | –10,5 |
| 60 | 2,31 | –160 | –6,5 |
| 55 | 2,34 | –130 | –5,3 |

Иілу тәжірибесі [D] конфигурациясы үшін жүргізілді. Жазық күйде оның резонанстық жиілігі 2,47 ГГц болды, ал иілген кезде резонанс төмен жиіліктерге ығысты (23-сурет, 8-кесте). Қисықтық радиусы 90 мм болғанда резонанстық жиілік 2,21 ГГц-ке дейін төмендеп, салыстырмалы ығысу 10,5 % құрады. 60 мм радиуста жиілік 2,31 ГГц (6,5 %), ал 55 мм радиуста 2,34 ГГц (5,3 %) болды. Барлық үш жағдайда резонанс айқын байқалды. Радиус кішірейген сайын $S_{11}$ минимумы тереңдеді және 55 мм радиуста −31 dB-ге жетті.

Жиілік ығысуы радиусқа монотонды тәуелді емес: ең үлкен ығысу ең аз иілген, 90 мм радиуста байқалды. Бұл нәтиже тек бір прототип пен бір өлшеу сериясына негізделген. Ығысудың себебі антенна мен цилиндр беті арасындағы ауа саңылауының әр өлшеуде әртүрлі болуы немесе иілгенде мата қалыңдығының өзгеруі болуы мүмкін, алайда бұл болжамдар бөлек тексерілмеді.

Иілген антенналардағы жиілік ығысуы әдебиеттерде де кездеседі. [119] шолуда 2,2–2,5 ГГц диапазонындағы икемді антенналар 200-ден 6 мм-ге дейінгі радиуста иілгенде резонанстық жиіліктің орташа салыстырмалы ығысуы полиимид төсеніште 2,93 %, политетрафторэтилен төсеніште 11,7 % болғаны көрсетілген. Осы жұмыста алынған 5,3–10,5 % ығысу аталған аралыққа сәйкес келеді.

Иілген күйде антенна торының резонансы 2,21–2,34 ГГц аралығында, яғни ISM 2,40–2,4835 ГГц диапазонынан төмен орналасты. Демек, жазық күйде жобаланған антенна торы денеге иіліп орналастырылғанда жұмыс жолағынан шығып кетуі мүмкін. Бастапқы резонансты жоғарырақ жиілікке қою бұл ығысудың бір бөлігін өтейді [81]. Алайда ығысу иілу радиусына қарай 5–10 % шегінде өзгеретіндіктен, бір түзету барлық радиусқа жетпейді. Бұл – киетін торды жобалаудағы шешілмеген шектеу, оны бағалау үшін өлшеуді бірнеше прототипте қайталау керек.

Иілу кезінде резонанстық жиіліктің ығысуын бірнеше физикалық механизммен түсіндіруге болады. Антенна цилиндрлік бетке иілгенде сәулелендіргіштің тиімді электрлік ұзындығы өзгереді: иілу бағытындағы өлшем проекцияда қысқарады, ал шеткі өрістердің таралу жағдайы өзгереді. Сонымен қатар, иілу кезінде мата созылады немесе сығылады, бұл төсеніштің жергілікті қалыңдығы мен тиімді өтімділігінің өзгеруіне әкеледі. Жерге тұйықтау қабаты да иіледі, сондықтан сәулелендіргіш пен жерге тұйықтау қабаты арасындағы өріс құрылымы жазық күйдегіден ерекшеленеді.

D конфигурациясында жиілік ығысуының иілу радиусына монотонды тәуелді болмауы назар аударады: ең үлкен ығысу ең кіші радиуста емес, 90 мм радиуста байқалды. Бұл нәтижеге тек геометриялық иілу ғана емес, өлшеу жағдайлары да әсер еткенін көрсетеді. Тәжірибеде антеннаны цилиндрлік бетке бекіту, матаның созылу дәрежесі, кабельдің орналасуы және антенна мен беттің арасындағы ауа саңылауы әр өлшеуде бірдей болмауы мүмкін. Сондықтан иілуге төзімділікті бағалағанда жеке радиустардағы мәндерден гөрі ығысудың жалпы деңгейі мен сәйкестендірудің сақталуы маңыздырақ.

Алынған нәтижелердің практикалық мәні мынада: киетін антеннаны жобалағанда иілу кезінде резонанстың төмен қарай ығысатынын алдын ала ескеру қажет. Ол үшін жазық күйдегі резонанстық жиілікті нысаналы жиіліктен сәл жоғары таңдауға немесе өткізу жолағын кеңейтуге болады. Бұл тәсіл антенна дененің әртүрлі бөліктеріне орналастырылғанда да жұмыс диапазонында қалуын қамтамасыз етеді.

### 3.3 Антеннаның электромагниттік қауіпсіздігін бағалау

Меншікті жұтылу коэффициенті (МЖК, SAR) радиожиіліктік сәулеленудің әсері кезінде адам ағзасының биологиялық тіндеріне жұтылатын электромагниттік энергия мөлшерін бағалаудың жалпыға танылған көрсеткіші болып табылады. Реттеуші нормалар МЖК-ның шекті рұқсат етілетін мәндерін белгілейді: АҚШ Федералдық байланыс комиссиясы (FCC) – 1г тінге орташаланған 1,6 Вт/кг-нан аспауы тиіс; Иондаушы емес сәулеленуден қорғау жөніндегі халықаралық комиссия (ICNIRP) – 10 г тінге орташаланған 2,0 Вт/кг-нан аспауы тиіс. Адам денесіне тікелей жақын жұмыс істейтін антенналар үшін осы нормалардың сақталуы шешуші маңызға ие [81].

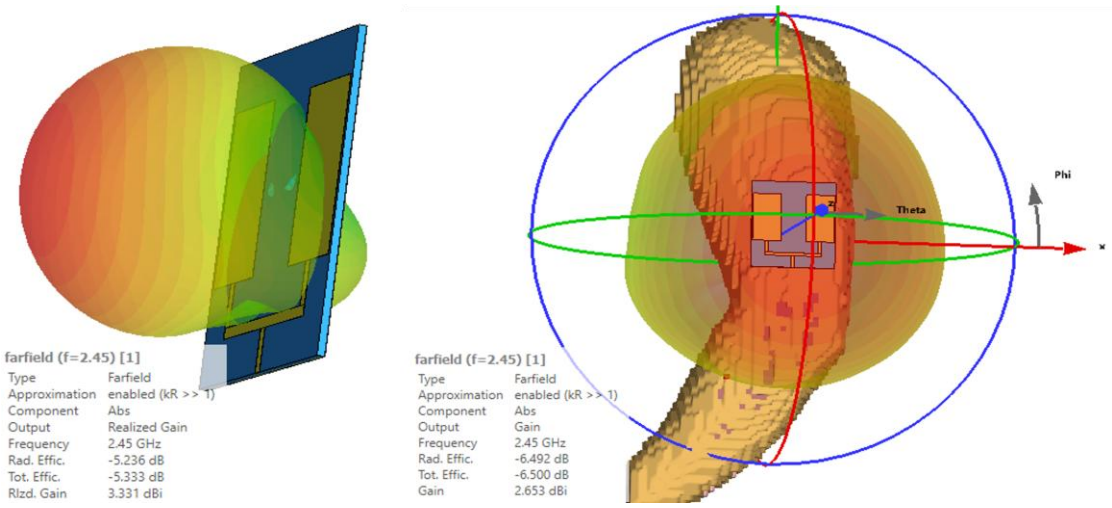
Меншікті жұтылу коэффициентін сандық бағалаудың физикалық негізін Джоуль–Ленц заңының дифференциалдық түрі құрайды. Оған сәйкес өткізгіш ортада электр тогының әсерінен бөлінетін меншікті жылулық қуат, яғни орта көлемінің бірлігінде шашырайтын қуат, ток тығыздығы мен электр өрісінің кернеулігінің көбейтіндісіне тең және ортаның электрөткізгіштігі арқылы келесідей өрнектелуі мүмкін: $w = j \cdot E = \sigma \cdot E^2$ [120]. Антеннаның электромагниттік өрісіндегі биологиялық тін электрөткізгіштігі $\sigma$ болатын өткізгіш орта ретінде қарастырылады, ал тін жұтатын электромагниттік қуат физикалық тұрғыдан тінде индукцияланған өрістің Джоульдік шығындарын білдіреді. Тін массасының бірлігіне келтірілген бұл шама меншікті жұтылу коэффициентін (SAR) анықтайды, сондықтан оны келесі түрде жазуға болады:

$$SAR = \frac{\sigma(E)^2}{\rho} = \frac{J^2}{\rho\sigma} \tag{20}$$

мұндағы $\sigma$ – биологиялық тіннің меншікті электрөткізгіштігі, *См/м;* $|E|$ – тіндегі электр өрісі кернеулігінің әсерлік мәні, *В/м;* $J$ – индукцияланған ток тығыздығы, *А/м²;* $\rho$ – тіннің көлемдік массалық тығыздығы, *кг/м³.* (20)-өрнектен тін сіңіретін қуат электр өрісі кернеулігінің квадратына және тіннің меншікті электрөткізгіштігіне пропорционал екені шығады. Осыған байланысты антеннаның меншікті жұтылу коэффициентін төмендету үшін жанасып тұрған тіндерде индукцияланатын өріс кернеулігін, ең алдымен әзірленген конструкцияларда қолданылған тұтас жерге тұйықтау қабатының экрандау әсері есебінен барынша азайту қажет [113].

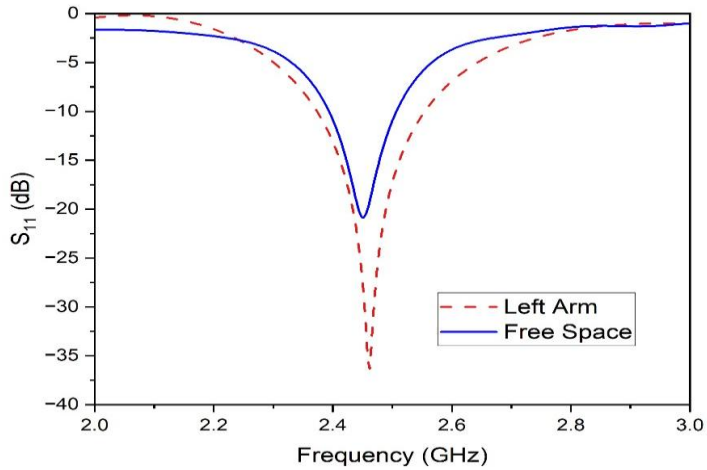
Электромагниттік қауіпсіздікті бағалау CST Studio Suite бағдарламалық кешенінде адам денесінің воксельдік моделін пайдалану арқылы жүргізілді. Антенна торының D конфигурациясы шынтақтан жоғары орналасқан білек

аймағының сыртқы жағына орналастырылып, воксельдік модельден 5 мм қашықтықта орналасқан, бұл құрылғыны тағудың практикалық сценарийіне сәйкес келеді. Антеннаның 2,45 ГГц жиілігіндегі еркін кеңістіктегі және адам денесінің воксельдік моделіне жақын орналасқан жағдайдағы алыс өріс бағытталу диаграммалары 24-суретте салыстырылған.




24 сурет – Ұсынылған антеннаның (D конфигурациясы) еркін кеңістіктегі (сол жақта) және адам денесінің воксельдік моделіндегі (оң жақта) есептік алыс өріс бағытталу диаграммасы [81]

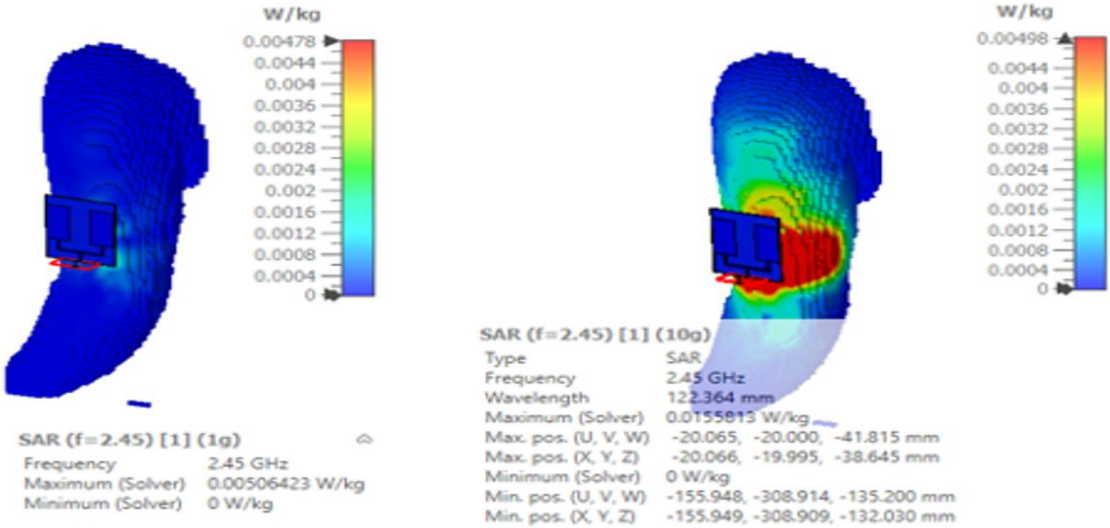
Адам денесіне орналастырылғанда D конфигурациясындағы тордың іске асырылған күшейту коэффициенті еркін кеңістіктегі 3,33 dBi-ден 2,65 dBi-ге дейін, яғни 0,68 dB-ге азайды (24-сурет). Радиациялық тиімділік 23,1 %-дан 22,4 %-ға (−6,49 dB) дейін төмендеді (7-кесте). Сәулеленген энергияның бір бөлігін дене тіндері жұтады және шашыратады (body-loading әсері), күшейтудің төмендеуі осымен байланысты [81]. Дене антеннаның сәйкестендіруіне де әсер етеді. Еркін кеңістіктегі және воксельдік модельдегі $S_{11}$ сипаттамалары 25-суретте салыстырылған




25 сурет – Ұсынылған антеннаның (D конфигурациясы) адам денесінің воксельдік моделіндегі есептік $S_{11}$ коэффициентінің еркін кеңістіктегі $S_{11}$ коэффициентімен салыстырмасы [81]

Сол қолға орналастырылған антеннада $S_{11}$ минимумы шамамен −21 dB-ден −36 dB-ге дейін тереңдеп, резонанс шамамен 10 МГц-ке жоғары ығысты. Мұны дене тіндерінің әсерінен жақын өрістегі тиімді диэлектрлік өтімділіктің өзгеруімен түсіндіруге болады. Екі жағдайда да резонанс ISM 2,4–2,4835 ГГц диапазонының ішінде қалды.

2,45 ГГц жиілікте модельденген МЖК-ның максималды мәні 1 г тінге орташалағанда 0,0051 Вт/кг, 10 г тінге орташалағанда 0,0156 Вт/кг болды, яғни FCC шегінен (1 г тінге 1,6 Вт/кг) шамамен 300 есе, ICNIRP шегінен (10 г тінге 2,0 Вт/кг) шамамен 130 есе аз. 26-суретте білек тіндеріндегі МЖК таралуы көрсетілген: жұтылу антеннаның тікелей астында ең үлкен және одан алыстаған сайын жылдам кемиді. Тұтас жерге тұйықтау қабаты денеге бағытталған сәулеленудің бір бөлігін экрандайды, МЖК мәнінің төмен болуы осыған байланысты [81].




26 сурет – 2,45 ГГц жиілігіндегі білек тіндеріндегі МЖК-ның таралуы: 1 г (сол жақта) және 10 г (оң жақта) [81]

1.4-бөлімде қарастырылған жұмыстардан айырмашылығы, бұл торда МЖК-ны төмендететін AMC, EBG немесе DGS құрылымдары жоқ. Соған қарамастан модельденген МЖК мәндері FCC және ICNIRP шектерінен 130–300 есе төмен болды, сондықтан тор бір текстильді төсеніш пен тұтас жерге тұйықтау қабатынан тұратын қарапайым күйінде қалдырылды. Бұл нәтиже воксельдік модельдегі есептеуге негізделген, МЖК тәжірибе жүзінде өлшенген жоқ.

Антенна торының МЖК мәндерінің төмен болуы конструкцияның ерекшеліктерімен байланысты. Тұтас жерге тұйықтау қабаты сәулелендіргіштер мен адам денесінің арасында экран рөлін атқарады және денеге қарай бағытталған сәулелену деңгейін шектейді. Сонымен қатар, антенна торында қуат екі сәулелендіргішке бөлінеді, сондықтан электр өрісі бір нүктеде шоғырланбай, аумақ бойынша таралады. Бұл тіндердегі жергілікті жұтылатын қуаттың азаюына ықпал етеді.

МЖК бойынша талдаудың киетін антенналар үшін маңызы ерекше. Мұндай антенналар денеге тікелей жанасып немесе одан бірнеше миллиметр қашықтықта ұзақ уақыт жұмыс істейді. Сондықтан тек антеннаның

электродинамикалық сипаттамалары ғана емес, оның қолданушы үшін қауіпсіздігі де міндетті түрде бағалануы тиіс. Осы жұмыста МЖК модельдеу арқылы есептелді, ал алынған мәндер нормативтік шектерден бірнеше есе төмен. Бұл антеннаның қосымша экрандаушы құрылымдарсыз, яғни конструкцияны күрделендірмей және иілгіштігін төмендетпей-ақ қауіпсіздік талаптарына сәйкес келетінін көрсетеді.

МЖК мәні антеннаның кіріс қуатына, денеден қашықтығына және дененің қай бөлігіне орналасқанына тәуелді екенін атап өту қажет. Модельдеу нақты бір орналасу жағдайы үшін жүргізілді. Практикада антенна киімнің қабаттары арқылы денеден біршама қашықтықта орналасатындықтан, нақты МЖК мәндері модельденген мәндерден аспайды деп күтуге болады.

### 3.4 Текстильді материалдардың антенна сипаттамаларына әсері

Текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттері (диэлектрлік өтімділік $\varepsilon_r$, диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсі $tan\delta$, төсеніштің қалыңдығы $h$ және ток өткізгіш қабаттың электрөткізгіштігі $\sigma$) антеннаның электрлік өлшемдерін анықтайды. Ал олар өз кезегінде, оның электродинамикалық сипаттамаларын: $S_{11}$ шағылу коэффициентін, күшейту коэффициентін, өткізу жолағын, сәулеленудің пайдалы әсер коэффициентін және бағытталу диаграммасын қалыптастырады. Бұл себеп-салдарлық байланыс осы бөлімде әзірленген екі элементті сызықтық антенна торының алты конфигурациясын зерттеу нәтижелері бойынша анықталды.

Модельдеу мен эксперименттік өлшеулер нәтижелеріне анализ жасау арқылы текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттерінің микрожолақты антенналардың сипаттамаларына әсер етуінің келесі заңдылықтарын тұжырымдауға болады:

1. Диэлектрлік өтімділік $\varepsilon_r$ жоғарылаған кезде антеннаның электрлік өлшемдері кішірейеді. Бұл резонанстық жиілік тұрақты сақталған жағдайда байқалады. Ал геометриялық өлшемдер өзгермесе, диэлектрлік өтімділіктің артуы резонанстық жиіліктің ығысуына себеп болады. Антенна торының үш төсеніш үшін есептелген геометриясы (6-кесте) осы тәуелділікті сандық түрде растайды: 2,45 ГГц бірдей резонанстық жиілікке баптау кезінде салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі ең төмен фетр төсенішінде ($\varepsilon_r = 1,45$) патчтың ұзындығы $L_p = 51,5$ *мм* және ені $W_p = 30$ *мм* құрады; джинс матада ($\varepsilon_r = 1,6$) бұл өлшемдер *48,02 мм* және *29 мм-ге* дейін, ал полиэстерде ($\varepsilon_r = 1,9$) *44,33 мм* және *28 мм-ге* дейін қысқарды. Сәйкесінше төсеніштің жалпы өлшемдері де *83,5×89,94 мм*-ден *76,33×85,94 мм*-ге дейін кішірейді [81].

2. Төсеніштің tg $\delta$ мәні артқан сайын энергияның көбірек бөлігі жылуға айналып, радиациялық тиімділік пен күшейту коэффициенті төмендейді [18]. Антенна торында бұл тәуелділік тікелей байқалмады. Мысалы, полиэстер төсенішінің tg $\delta$ мәні ең аз (0,02), бірақ тордың тиімділігі дәл осы төсеніште ең төмен (16,6 %) болды. Мұны полиэстердің 0,48 мм қалыңдығымен байланыстыруға болады, алайда қалыңдық жеке өзгертілмегендіктен, оның үлесін бөлек бағалау мүмкін болмады.

3. Төсеніш қалыңдығы *h* өткізу жолағы мен кіріс кедергісіне әсер етеді. Қалыңдығы 2,0 мм фетрдегі антенналардың өткізу жолағы жұқа полиэстердегіден кеңірек болды және $S_{11}$ сипаттамасында екі резонанс анығырақ байқалды [81]. Сонымен қатар фетрдің кеуекті құрылымы прототипті дайындау кезінде қалыңдықтың біркелкі болмауына әкеліп, өлшенген $S_{11}$ мәнін модельденген мәннен алшақтатты. Мысалы, А конфигурациясында модельдеу бойынша $S_{11} = -20$ dB болса, өлшенген мән −7 dB болып, $S_{11} \leq -10$ dB шартын қанағаттандырмады.

4. Өткізгіштің $\sigma$ мәні артқан сайын омдық шығын азаяды [18]. Мыс таспаның өткізгіштігі ($5{,}8 \cdot 10^7$ См/м) ток өткізгіш матаныкінен ($2{,}9 \cdot 10^4$ См/м) шамамен 2000 есе жоғары болғанымен, бір төсеніштегі конфигурациялардың сипаттамалары іс жүзінде бірдей болды: джинс матасында күшейту коэффициенті 2,58 және 2,56 dBi, тиімділік 23,2 және 23,1 %, ал фетрде ток өткізгіш матасы бар конфигурацияның көрсеткіштері тіпті сәл жоғары шықты (3,33 dBi қарсы 3,23 dBi) [81]. Демек, зерттелген антенна торында радиациялық тиімділікті негізінен өткізгіш емес, төсеніш материалы анықтайды, ал ток өткізгіш мата мыс таспаны сәулелену сипаттамаларын сақтай отырып алмастыра алады. Сәйкестендіру бойынша ең терең модельденген минимум ($S_{11} = -38$ dB) полиэстер мен ток өткізгіш матадан тұратын F конфигурациясында алынды, бірақ осы прототиптің өлшенген мәні −16 dB болды, яғни модельдеу мен өлшеу арасындағы айырмашылық алты конфигурацияның ішінде ең үлкен.

5. Текстильді төсеніштің қалыңдығы *h* және оның серпімділік қасиеттері антеннаның механикалық деформацияларға, ең алдымен иілуге, төзімділігін айқындайды. Иілу кезінде сәулелендіргіш элементтің тиімді электрлік ұзындығы мен төсеніштегі өрістің таралуы өзгереді, бұл резонанстық жиіліктің ығысуына алып келеді. Қалыңдығы *h = 2,0 мм* джинс мата төсенішінде орындалған антенна торының D конфигурациясында қисықтық радиустары 55–90 мм аралығында иілу жазық күйдегі 2,47 ГГц резонансының 2,21–2,34 ГГц мәндеріне дейін ығысуына себеп болды, ал салыстырмалы ығысу 5,3–10,5 % құрады (8-кесте). Сонымен бірге қисықтық радиусы азайған сайын импеданстық сәйкестендіру нашарламай, керісінше жақсарды: 55 мм радиуста $S_{11}$ минимумы шамамен –31 dB деңгейіне жетті. Осыдан иілуге сезімталдық ең алдымен төсеніштің қалыңдығымен және деформация кезінде сәулелендіргіш элементтің тиімді электрлік ұзындығының өзгеруімен айқындалатыны, ал жиіліктік ығысудың заңды сипатқа ие болуы оны жобалау кезеңінде алдын ала өтеуге мүмкіндік беретіні байқалады [81].

6. Текстильді төсеніш пен тұтас өткізгіш жерге тұйықтау қабатының үйлесімі антеннаның меншікті жұтылу коэффициентінің (МЖК) деңгейін айқындайды. Адам денесінің воксельдік моделінде 2,45 ГГц жиілігінде жүргізілген есептеу нәтижесінде антенна торының D конфигурациясы үшін 1 г тінге орташаланған МЖК 0,005 Вт/кг, ал 10 г тінге орташаланған МЖК 0,015 Вт/кг мәндерін көрсетті. Бұл көрсеткіштер FCC белгілеген 1,6 Вт/кг және ICNIRP белгілеген 2,0 Вт/кг шекті деңгейлерінен екі реттік шамадан астам төмен. Дене бетіне жақын орналасқан кезде күшейту коэффициенті 3,331 dBi-ден 2,653 dBi-ге дейін төмендейді, ал импеданстық сәйкестендіру нашарламайды: $S_{11}$

минимумы еркін кеңістіктегі шамамен –20 dB мәнінен –36 dB деңгейіне дейін тереңдейді. Осылайша, салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі төмен текстильді төсеніш пен тұтас жерге тұйықтау қабатын қолдану жасанды магниттік өткізгіш (AMC) немесе электромагниттік тыйым салынған аралық (EBG) типті қосымша құрылымдарды енгізбей-ақ нормативтік талаптарды қанағаттандыратын МЖК деңгейін қамтамасыз етуге жеткілікті болды [81].

Жүргізілген зерттеу нәтижелері текстильді төсенішті таңдау кезінде бірнеше параметрді қатар ескеру қажеттігін көрсетті. Қарастырылған материалдардың ішінде джинс матаны ток өткізгіш матамен бірге пайдалану күшейту коэффициенті, импеданстық тұрақтылық және механикалық иілгіштік арасында қолайлы арақатынас берді. Полиэстер негізінде күшейту коэффициенті төмен болғанымен, $S_{11}$ параметрі бойынша ең жақсы сәйкестендіру нәтижесі алынды. Фетр негізі технологиялық ауытқуларға сезімтал болғанымен, күшейту коэффициенті бойынша жоғары көрсеткіштерге ие болды [81].

Антенна торының алты конфигурациясында анықталған заңдылықтар микрожолақты сәулелендіргіштің жалпы физикалық табиғатына негізделгендіктен, оларды келесі бөлімде әзірленетін Яги–Уда антеннасын қоса алғанда, өзге топологиядағы конструкцияларды жобалау кезінде де бастапқы негіз ретінде пайдалануға болады. Алынған тәуелділіктер микрожолақты антенналар теориясымен және әдебиет деректерімен үйлеседі. $\varepsilon_r$ кіші болғанда сәулелендіргіштің физикалық өлшемі ұлғайып, өріс төсенішке азырақ шоғырланады, соның нәтижесінде бағыттылық пен күшейту коэффициенті өседі, өткізу жолағы кеңейеді [10, 47]. tg $\delta$ кемігенде диэлектриктегі шығын азайып, радиациялық тиімділік артады [66]. Қалың төсеніш өткізу жолағын кеңейтеді, бірақ беттік толқындарды күшейтеді, ал резонанстық жиілікті дайындау дәлсіздігі мен иілуге сезімталырақ етеді [47, 107].

Сондықтан текстильді төсенішті таңдау барысында тек бір параметрге сүйену жеткіліксіз. Күшейту коэффициенті, сәулелену тиімділігі, өткізу жолағы және антенна сипаттамаларының тұрақтылығы бірге қарастырылуы тиіс. Осы параметрлер арасындағы қолайлы арақатынас жұмыста әзірленген антенна конструкцияларын жобалау кезінде негізгі талаптардың бірі ретінде қабылданды.

Анықталған заңдылықтардың практикалық құндылығы мынада: олар әзірлеушіге жаңа текстильді материалды қолданбас бұрын антенна сипаттамаларының өзгеру бағытын алдын ала бағалауға мүмкіндік береді. Мысалы, өтімділігі төмен және қалың мата таңдалса, антенна өлшемі үлкейеді, бірақ бағыттылық пен тиімділік жоғарылайды. Ал өтімділігі жоғары немесе жұқа мата антеннаны ықшамдайды, бірақ күшейту коэффициентінің төмендеуіне әкеледі. Осылайша, материал таңдау кезінде антеннаның өлшемі, күшейту коэффициенті және иілгіштігі арасында ымыраға келу қажет.

Сонымен қатар, өткізгіш материалдың сәулелену сипаттамаларына әсері аз болғандықтан, әзірлеуші өткізгішті электрлік көрсеткіштерден гөрі механикалық және технологиялық талаптар бойынша таңдай алады. Бұл киімге біріктірілетін антенналарды жобалауды едәуір жеңілдетеді, өйткені иілгіш және жууға төзімді өткізгіш маталарды қолдану мүмкіндігі артады.

***3 – бөлім бойынша қорытынды***

IoT-қосымшаларына арналған текстильді төсеніш негізіндегі екі элементті сызықтық антенна торы әзірленіп, оның параметрлері оңтайландырылды. Зерттеу барысында үш түрлі текстильді материал, яғни фетр, джинс мата және полиэстер, екі ток өткізгіш материалмен салыстырылды. Олар мыс таспасы мен ток өткізгіш матадан тұрды. Нәтижесінде алты түрлі конфигурация қарастырылды.

Эксперименттік зерттеу ең жоғары сәйкестендіру көрсеткіші мыс таспасы бар полиэстер конфигурациясында (–28 dB), ал күшейту коэффициенті, сәйкестендіру және иілгіштік бойынша ең жақсы теңгерім джинс мата мен ток өткізгіш мата қолданылған конфигурацияда алынғанын көрсетті. Бұл жағдайда $S_{11}$ мәні –25 dB болды. Антенна торының сәулелену диаграммасы антенна жазықтығына нормаль бағытта орналасқан максимумға ие кең бағытталу сипатымен ерекшеленеді. Күшейту коэффициенті 0,86–3,33 dBi аралығында анықталды; ол өткізгіш материалына емес, төсеніш материалына тәуелді, сондықтан ток өткізгіш мата мыс таспаны сәулелену сипаттамаларын сақтай отырып алмастыра алады. Адам денесінің воксельдік моделі негізінде жүргізілген электромагниттік қауіпсіздікті бағалау 1 г тінге орташаланған меншікті жұтылу коэффициентінің 0,005 Вт/кг, ал 10 г тінге орташаланған МЖК-ның 0,015 Вт/кг екенін көрсетті. Бұл мәндер FCC (1,6 Вт/кг) және ICNIRP (2,0 Вт/кг) белгілеген шекті мәндерден едәуір төмен. МЖК төмен деңгейіне АМС немесе EBG типті қосымша құрылымдарды қолданбай, тұтас жерге тұйықтау қабаты мен текстильді төсеніште ұтымды таңдау есебінен қол жеткізілді.

Алты конфигурацияны, сондай-ақ иілу мен электромагниттік қауіпсіздік бойынша алынған деректерді өзара салыстыру негізінде текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттерінің антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары анықталды. Аталған заңдылықтар қорғауға ұсынылатын 1-қағиданың мазмұнын құрайды. Олар келесі тарауда Яги–Уда антеннасын әзірлеудің бастапқы негізі ретінде пайдаланылады.

Осы бөлімдегі зерттеу нәтижелері автордың [81] ғылыми жұмысында жарияланған.

## 4 Текстильді төсеніштегі яги–уда антеннасын әзірлеу және оңтайландыру

### 4.1 Антенна конструкциясы, геометриялық параметрлері және модельдеу нәтижелері

Микрожолақты Яги–Уда антеннасы жазық, жеңіл, оны арзан материалдардан жасауға болады [82]. Бағытталған сәулелену алу үшін оған бір өткізгіш қабат жеткілікті. Әзірленген антеннада белсенді элемент, рефлектор және екі директор бар, барлығы бір қабатта орналасқан. Белсенді элемент 2.1-бөлімде сипатталған, ойықтар арқылы кірістірілген микрожолақты желіден қоректенеді. Директорлар мен рефлекторға жеке желі тартылмаған: оларға энергия белсенді элементтің шеткі өрісі арқылы жетеді. Қауіпсіздік және құтқару жүйелеріне арналған алғашқы нұсқасын автор [121] жұмысында жариялаған.

Классикалық Яги–Уда антеннасынан айырмашылығы, ұсынылып отырған конструкция микрожолақты орындалуда жасалып, активті (қоздырылатын) элементті және пассивті элементтерді (рефлектор мен екі директорды) қамтиды. Активті элемент тарату желісімен тікелей жалғанып, қорек көзінен энергия алады. Пассивті элементтер энергияны активті элементпен немесе басқа пассивті элементпен өзара индуктивті байланыс арқылы алады. Пассивті элементтің қызметі оның резонанстық ұзындығының көршілес элементтердің резонанстық ұзындықтарына қатынасымен анықталады: резонанстық ұзындығы үлкен элемент индуктивті реактивтілікті енгізіп, рефлектор қызметін атқарады, өз бағыты бойынша сәулелену қарқындылығын төмендетіп, қарама-қарсы бағытта күшейтеді; ал резонанстық ұзындығы кіші элемент сыйымдылықты реактивтілікті енгізіп, директор қызметін атқарады және өз бағыты бойынша өріс кернеулігін арттырады. Сонымен бірге микрожолақты орындалуда пассивті элементтердің резонанстық ұзындықтары активті элементпен абсолюттік салыстыру арқылы емес, бір-біріне қатысты (21)-(22)-қатынастармен анықталады, өйткені элементтер арасындағы байланыс негізінен жақын шеткі өріс арқылы жүзеге асады [82].

Ұсынылған антеннаның активті (қоздырылатын) элементі геометриялық өлшемдері 2.1-бөлімде келтірілген микрожолақты антенналар теориясының классикалық (2)-(6) қатынастары бойынша есептелетін тікбұрышты микрожолақты патч түрінде орындалған: $W_D$ ені (2)-өрнек арқылы анықталып, кіріс кедергісі мен өткізу жолағын айқындайды, ал шамамен бағытталатын толқын ұзындығының жартысына сәйкес келетін $L_D$ резонанстық ұзындығы шеткі өрістің ұзаруын (5)-(6) ескере отырып, тиімді ұзындық (4) арқылы анықталады. Джинс негізі үшін патч енінің аналитикалық мәні ($W_D = 53{,}7$ *мм*) 10-кестеде көрсетілген активті элементтің енімен сәйкес келеді, бұл сәулелендіргішті есептеудің бірыңғай әдістемесін зерттелген екі топология үшін де қолдануға болатындығын растайды.

Яги–Уда антеннасының бағытталу қасиеттері резонанстық ұзындықтары активті элементке қатысты таңдалатын пассивті элементтер арқылы қалыптастырылады. Резонанстық ұзындығы қысқа директорлар сыйымдылықты

реактивтілікті енгізіп, толқынның фазалық фронтын сәулелену бағытына қарай алға ығыстырады, ал резонанстық ұзындығы үлкен рефлектор индуктивті реактивтілікті енгізіп, сәулеленуді кері бағытқа шағылдырады. Директорлардың ұзындығы активті элементтен сәулелену бағыты бойынша алыстаған сайын біртіндеп азаяды:

$$L_{Dn} = k_D \cdot L_{D(n-1)} \tag{21}$$

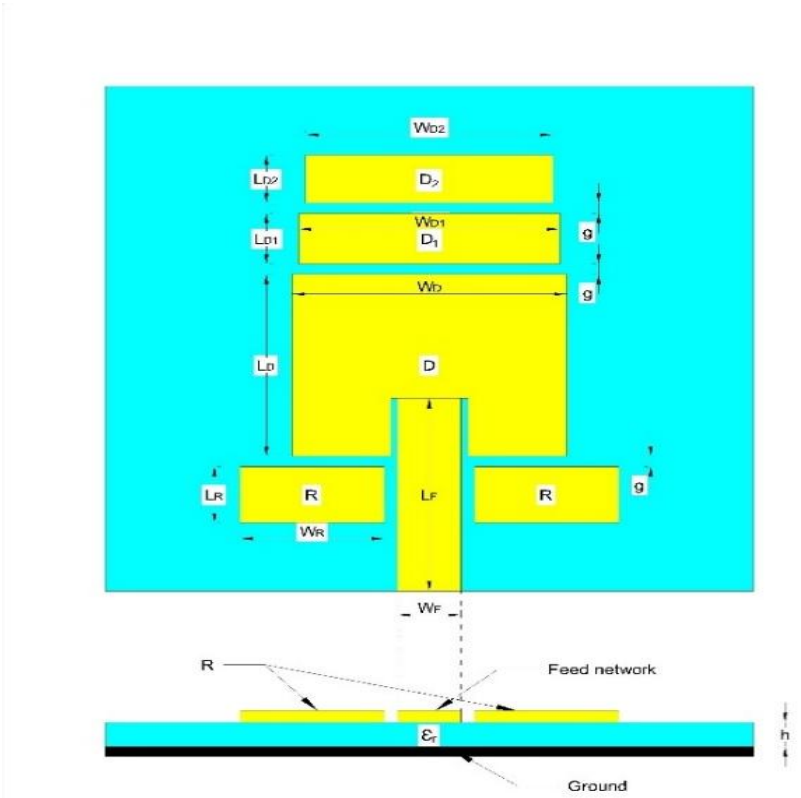
мұндағы $k_D < 1$ – көршілес директорлардың қысқарту коэффициенті, ал $L_{D(n-1)}$ – алдыңғы директордың ұзындығы. Өз кезегінде рефлектордың ұзындығы активті элементке ең жақын орналасқан директордың ұзындығынан үлкен болады:

$$L_R = k_R \cdot L_{D1} \tag{22}$$

мұндағы $k_R > 1$ – рефлекторды ұзарту коэффициенті. Ұсынылған конструкция үшін бұл коэффициенттердің алынған мәндері $k_D \approx 0{,}95$ және $k_R \approx 1{,}10$ (10-кесте), бұл пассивті элементтердің резонанстық ұзындықтарының рефлектордан алдыңғы директорға қарай біртіндеп кемуін ($L_R > L_{D1} > L_{D2}$) және тұрақты бағытталған сәулеленуді қалыптастыруды қамтамасыз етеді. Директорлар саны мен олардың ұзындығының жазық Яги–Уда антеннасының күшейту коэффициенті мен өткізу жолағына анықтаушы әсері эксперименттік түрде де расталған: [111] жұмысында директорлар ұзындығының артуы күшейту коэффициентін бір мезгілде арттыра отырып, өткізу жолағын 16,5 %-дан 23,3 %-ға дейін кеңейтуге мүмкіндік берген.

Микрожолақты нұсқаның жұмыс принципі сымды Яги–Уда антеннасынан өзгеше. Сымды антеннада элементтер бір-бірінен 0,15–0,35$\lambda$0 қашықтықта тұрады және сәулеленген өріс арқылы әсерлеседі [18]. Микрожолақты антеннада олар әлдеқайда жақын, ал байланысты жиектердегі шеткі өріс қамтамасыз етеді. Әзірленген конструкцияда белсенді элемент пен рефлектордың арасы небәрі 2,56 мм, шамамен 0,02$\lambda$0. Саңылау тарылған сайын байланыс күшейеді; антеннаның ықшам болуы да осы қасиетке негізделген.

Антенна 2.1-бөлімдегі үш кезеңмен жобаланды, геометриясы 27-суретте көрсетілген.




27 сурет – Ұсынылған микрожолақты Яги–Уда антеннасының геометриясы [82]

Антенна торындағыдай, элементтер тікбұрышты патч түрінде жасалды (1.1-бөлім). Сәулеленудің бағыты мен деңгейі белсенді және пассивті элементтердің шеткі өріс арқылы байланысына тәуелді [23, 110], сол үшін элементтердің өлшемдері мен өзара орны бірге таңдалды.

Антеннаның тікбұрышты элементтері түзу жиектерімен бір-біріне параллель орналасқан. Осы геометрияның нәтижесінде $g$ байланыс саңылауы элементтердің бүкіл ені бойында тұрақты болып қалады. Бұл пассивті элементтердің шеткі өріс арқылы біркелкі қоздырылуына жағдай жасайды. Сонымен бірге олардың арасында амплитудалық және фазалық қатынастардың тұрақты сақталуына мүмкіндік береді. Сәулелену максимумы бағытында элементтерден таралған электромагниттік өрістердің синфазалық қосылуы осындай орналасу арқылы қамтамасыз етіледі.

Элементтердің жиектері қисық немесе көлбеу болған жағдайда олардың арасындағы қашықтық байланыс бағыты бойынша өзгерер еді. Мұндай өзгеріс электромагниттік байланыстың әлсіреуіне және элементтер арасындағы фазалық біртектіліктің бұзылуына әкелуі мүмкін. Әсіресе ықшам микрожолақты конструкцияларда элементтер арасындағы саңылау аз болғандықтан, мұндай геометриялық өзгерістер тұрақты бағытталу диаграммасын қалыптастыруға кері әсер етеді. Ұсынылған конструкцияда $g = 2{,}56$ мм $\approx 0{,}02\lambda_0$ болатын шағын саңылаудың сақталуы осы тұрғыдан маңызды.

Тікбұрышты патчтың ұзындығы мен енін жеке-жеке өзгерту Яги–Уда антеннасының қажетті жұмыс принципін жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Активті элементпен салыстырғанда директорлар электрлік тұрғыдан қысқарақ,

ал рефлектор ұзынырақ етіп таңдалды. Олардың өлшемдік коэффициенттері сәйкесінше $k_D \approx 0,95$ және $k_R \approx 1,10$ болды [110]. Мұндай параметрлерді элементтердің ұзындығын өзгерту арқылы алуға болады. Бұл кезде байланыс саңылауының енін немесе импеданстық сәйкестендіру шарттарын қайта қарау қажет емес. Активті элементтер, директорлар және рефлектор үшін күміс қолданылды. Жерге тұйықтау қабаты мыс негізінде орындалды [82].

Микрожолақты антенналарға арналған диэлектрлік төсеніштердің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі әдетте $2,2 \leq \varepsilon_r \leq 12$ аралығында болады. Осы зерттеуде антеннаны жасау үшін диэлектрлік өтімділігі салыстырмалы түрде төмен үш текстильді материал таңдалды. Олар джинс мата, мақта мата және 100 % полиэстер болды.

Ұсынылған антеннаның негізгі жобалық параметрлері 9-кестеде көрсетілген. Геометриялық өлшемдерді анықтау үшін осы жұмыстың 2.1-бөлімінде қарастырылған микрожолақты антенналар теориясының классикалық (2)–(12) қатынастары пайдаланылды. Есептеулер үш түрлі текстильді төсеніш үшін жеке жүргізілді.

9 кесте – Яги–Уда антеннасының жобалық параметрлері

| Параметрі | Мәні |
|---|---|
| Жұмыс жиілігі | 2,45 ГГц |
| Тарату желісі | Микрожолақты фидер |
| Патч материалы | күміс |
| Патчтың қалыңдығы, мм | 0,07 |
| Төсеніштің материалы | джинс / полиэстер / мақта мата |
| Төсеніштің қалыңдығы, мм | 0,52 / 0,12 / 0,22 |
| Жергі тұйықтау қабатының материалы, мм | мыс |
| Жергі тұйықтау қабатының қалыңдығы, мм | 0,035 |

Микрожолақты антенналарды жобалаудағы негізгі мәселелердің бірі – кең өткізу жолағына және жоғары тиімділікке қол жеткізу. Өткізу жолағының тар болуы антеннаның сигналдарды тиімді қабылдау мүмкіндігін шектесе, тиімділіктің төмен болуы оның жалпы жұмыс сипаттамаларының нашарлауына алып келеді. Осы мәселелерді шешу мақсатында конструкцияда ойық арқылы кірістіріп қоректендіру (inset-fed) әдісі қолданылып, нәтижесінде өткізу жолағының ені 200 МГц-тен жоғары мәнге жеткізілді. Сонымен қатар, антенна конструкциясы модельдеу кезінде де, дайын үлгіні дайындау барысында да шағылу коэффициентінің $S_{11} < -10$ dB мәнін қамтамасыз ететіндей етіп есептелді, бұл сигналдың шағылуынан болатын шығындарды барынша азайтуға мүмкіндік береді [82].

Үш зерттелген текстильді төсеніш үшін (джинс матасы, мақта мата және полиэстер) Яги–Уда антеннасының есептік геометриялық параметрлері 10-кестеде келтірілген.

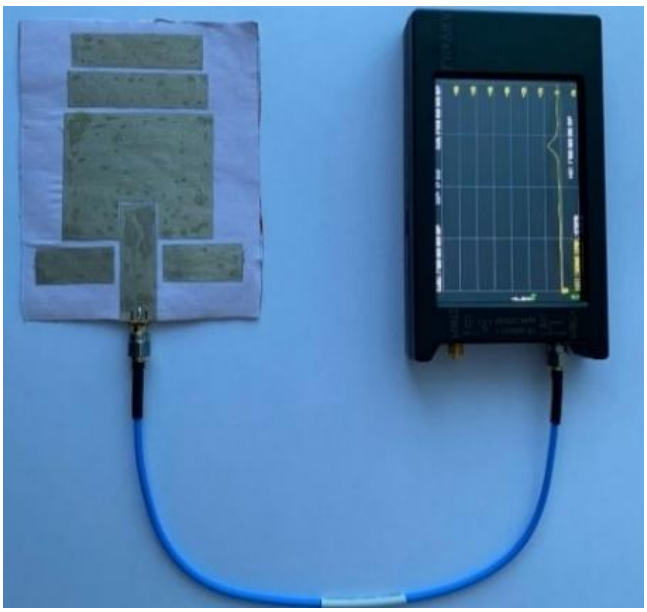
Яги–Уда антеннасын оңтайландыру кезінде оның параметрлері де тұрақты және өзгермелі параметрлерге бөлінеді. Тұрақты параметрлерге жұмыс жиілігі $f_0$

*= 2,45 ГГц*, тракттың толқындық кедергісі $Z_0 = 50$ *Ом*, сондай-ақ таңдалған текстильді материалға байланысты берілетін диэлектрлік өтімділік $\varepsilon_r$ және төсеніш қалыңдығы $h$ жатады; белсенді элемент ойық арқылы енгізілген (inset-fed) микрожолақты сызықтық қоректендіру арқылы қоздырылады. Өзгермелі параметрлер тұрақты бағытталған сәулеленуді қалыптастыру және қабылданған келісу мен тиімділік өлшемшарттарына қол жеткізу мақсатында оңтайландыру барысында таңдалады: белсенді элементтің $L_D$ ұзындығы 2,45 ГГц жиілігінде резонансты қамтамасыз етеді (бағытталған толқын ұзындығының шамамен жартысына тең); директорлардың $L_{D1}$ және $L_{D2}$ ұзындықтары белсенді элементтен қысқа етіп таңдалады ($k_D \approx 0,95$) және фазалық фронтты алға ығыстырып, бағыттылықты арттырады; рефлектордың $L_R$ ұзындығы сәулеленуді кері бағытта шағылыстыру үшін белсенді элементтен ұзын етіп алынады ($k_R \approx 1,10$); байланыс саңылауы $g$ элементтер арасындағы шеттік байланыстың күшін анықтайды *(2,56 мм ≈ 0,02λ₀),* ал inset ойығының тереңдігі кіріс кедергісін 50 Ом-ға дейін сәйкестендіруді қамтамасыз етеді.

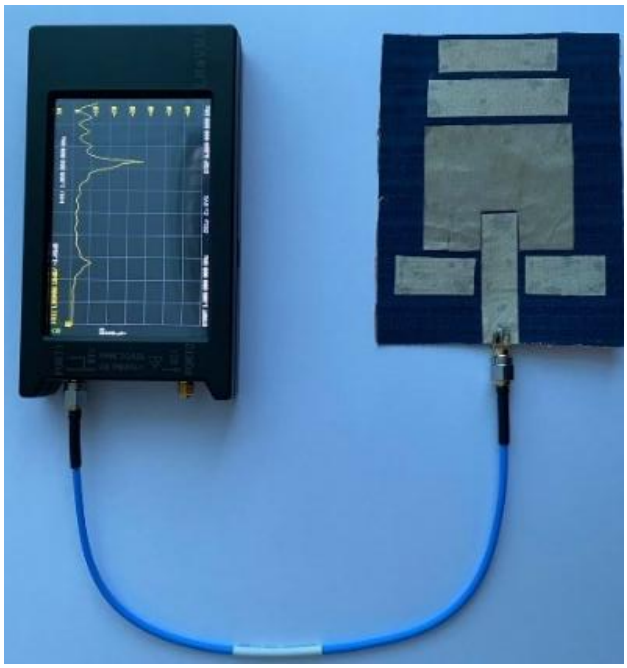
10 кесте – Үш төсенішке арналған Яги–Уда антеннасының есептік геометриясы [82]

| Параметр, мм | Джинса | Мақта мата | Полиэстер |
|---|---|---|---|
| $W_D$ (патчаның ені) | 53,7 | 55,28 | 50,81 |
| $W_{D1}$ (директорлың ені 1) | 54 | 52,5 | 48,2 |
| $W_{D2}$ (директорлың ені 2) | 48,33 | 49,7 | 45,7 |
| $W_R$ (рефлектордың ені) | 28,2 | 31 | 26,6 |
| $W_F$ (фидердің ені) | 12,45 | 13,19 | 11,02 |
| $L_D$ (патчтің ені) | 45,7 | 47,84 | 42,18 |
| $L_{D1}$ (директорлың ұзындығы 1) | 12,75 | 13,12 | 12,07 |
| $L_{D2}$ (директорлың ұзындығы 2) | 12,08 | 12,42 | 11,4 |
| $L_R$ (рефлектордың ұзындығы) | 14,1 | 14,5 | 13,3 |
| $L_F$ (фидердің ұзындығы) | 44,39 | 44,39 | 44,39 |
| $g$ (патч пен рефлектор арасындағы саңылау) | 2,56 | 2,56 | 2,56 |

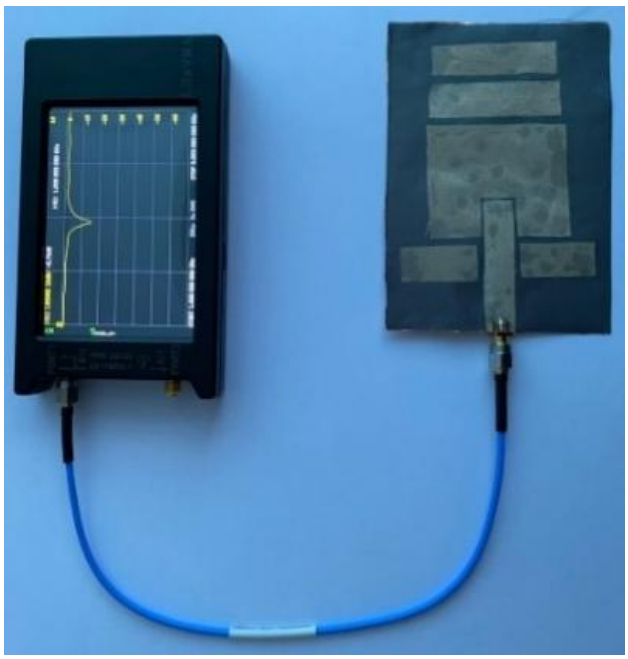
Есептелген және оңтайландырылған параметрлер негізінде үш түрлі текстильді төсеніште Яги–Уда антеннасының прототиптері дайындалды. Дайындалған прототиптердің сыртқы көрінісі 28-30 суреттерінде көрсетілген.



28 сурет – Дайындалған Яги–Уда антеннасының мақта мата төсенішіндегі прототипі [82]



29 сурет – Дайындалған Яги–Уда антеннасының джинс матасы төсенішіндегі прототипі [82]



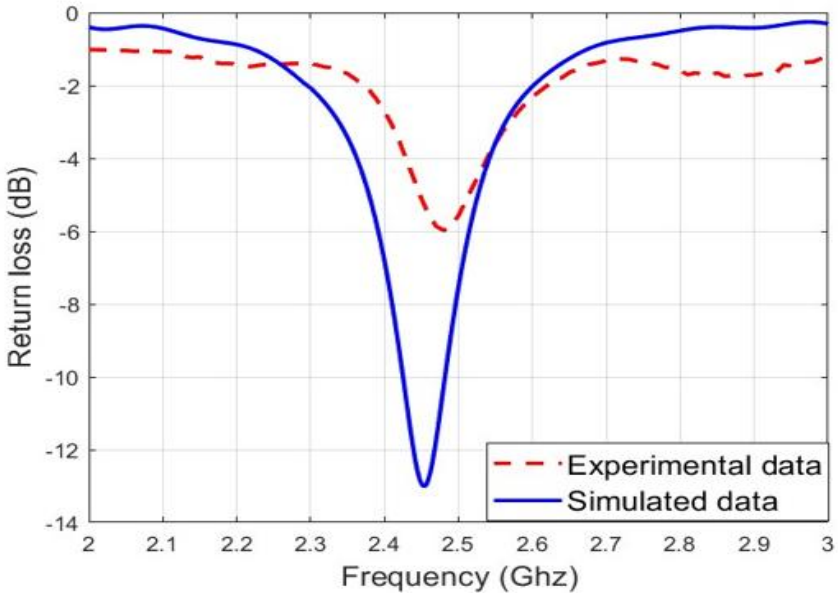
30 сурет – Дайындалған Яги–Уда антеннасының полиэстер төсенішіндегі прототипі [82]

Дайындалған прототиптердің шағылысу коэффициенті $S_{11}$ NanoVNA анализаторының көмегімен өлшенді. Өлшеу әдістемесі 2-бөлімде сипатталған әдіске сәйкес жүргізілді: өлшеу алдында анализатор «бос жүріс – қысқа тұйықталу – келісілген жүктеме» сұлбасы бойынша калибрленді, прототип SMA ажыратқышы бар коаксиалды тракт арқылы өлшеу портына қосылды, ал шағылысу коэффициенті 2,45 ГГц резонанстық жиілігін қамтитын жиілік жолағында тіркелді.

Яги–Уда антеннасының сәулелену сипаттамалары (күшейту коэффициенті, бағыттылық және радиациялық тиімділік) электродинамикалық модельдеу әдісімен анықталды, ал эксперименттік верификация шағылысу коэффициенті $S_{11}$ бойынша жүргізілді. Тарату желілеріндегі сигнал шағылыстарын сипаттаудың бірнеше әдісі бар, олардың негізгілеріне кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті (КТК) және әдетте тізбек анализаторларында $S_{11}$ параметрі түрінде көрсетілетін шағылысу коэффициенті жатады.

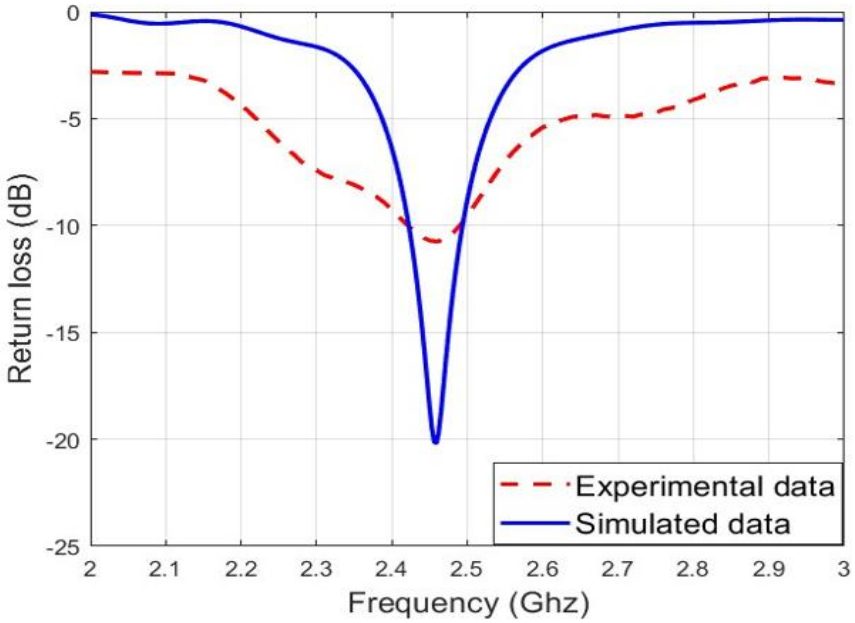
Шағылысу коэффициенті $S_{11}$, сондай-ақ кері шығындар деп аталатын параметр, тарату желісі арқылы шағылысқан сигнал қуатының шығынын сипаттайды. Микротолқынды құрылғылар үшін қуатты барынша тиімді беру мақсатында кері шығындар –10 dB-ден төмен болуы тиіс [82]. Бұл мән 2.1-бөлімде қабылданған сәйкестендіру өлшемшартына ($S_{11} \leq -10\ dB$, эквивалентно КТТК ≤ 2 баламалы, (13)–(14) қатынастары) сәйкес келеді. Бұдан әрі келтірілген Яги–Уда антеннасына қатысты барлық $S_{11}$ және КТК мәндері дәл осы өлшемшарт бойынша бағаланады, ал радиациялық тиімділік (15) қатынасы бойынша, яғни іске асырылған күшейту коэффициентінің бағыттылық коэффициентіне қатынасы ретінде тексеріледі.

Мақта мата төсенішіндегі Яги–Уда антеннасы үшін $S_{11}$ шағылысу коэффициентін модельдеу және эксперименттік өлшеу нәтижелері 31-суретте көрсетілген.



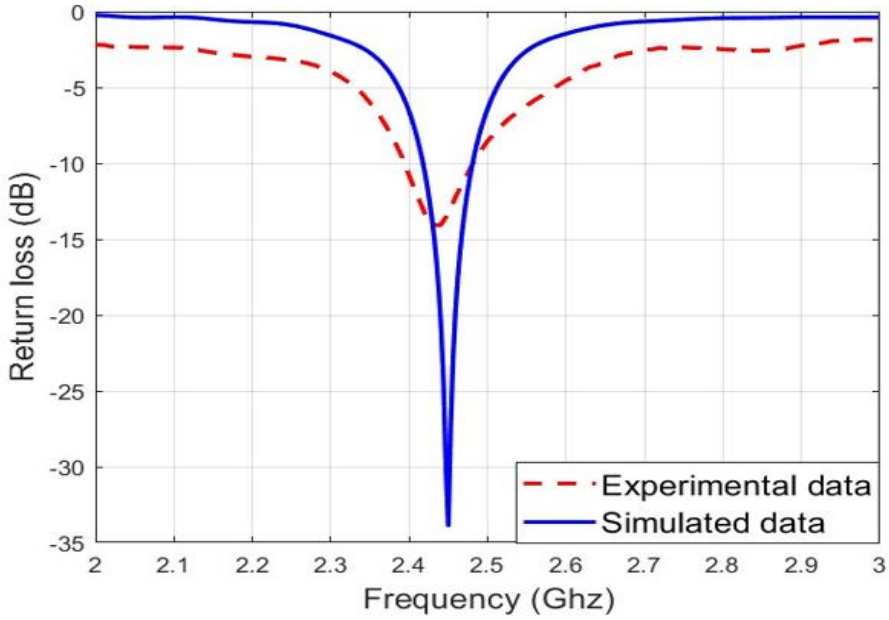

31 сурет – Мақта мата төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының $S_{11}$ [82]

31 суреттен көрініп тұрғандай, мақта мата төсенішіндегі модельденген Яги–Уда антеннасының кері шығындары 2,45 ГГц жиілігінде –12,9 dB мәніне жетеді, ал дайындалған антеннаның кері шығындары 2,48 ГГц шамалы ығысқан жиілікте –6,1 dB құрайды. Джинс төсенішіндегі антенна үшін шағылысу коэффициенті $S_{11}$ мәнін модельдеу және эксперименттік өлшеу нәтижелері 30-суретте келтірілген.




32 сурет – Джинс төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының $S_{11}$ [82]

32-суретке сәйкес, джинс төсенішіндегі модельденген антенна –20,1 dB кері шығындарға қол жеткізеді, бұл қуаттың 99 %-ын беруге сәйкес келеді; дайындалған антенна үшін $S_{11}$ параметрі 2,45 ГГц жиілігінде –10,84 dB құрайды. Полиэстер төсенішіндегі антеннаға қатысты нәтижелер 33-суретте көрсетілген.




33 сурет – Полиэстер төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының $S_{11}$ [82]

33-суреттен көрініп тұрғандай, 100 %-дық полиэстер төсенішіндегі модельденген антеннаның кері шығындары 2,45 ГГц жиілігінде –33,9 dB құрайды, бұл қуаттың 99,9 %-ының берілуін білдіреді; дайындалған антенна үшін $S_{11}$ параметрінің эксперименттік нәтижесі 2,43 ГГц шамалы ығысқан жиілікте –14,9 dB құрайды. Талдау нәтижесінде алынған және бақыланған резонанстық жиіліктер арасындағы байқалған алшақтық (өлшенген мәннің 2,40 ГГц-тен 2,48 ГГц-ке дейін ығысуы) негізінен антеннаны қолмен дайындау процесіндегі қателіктерге, SMA жалғағышының тұрақсыз жұмысына және коаксиалды кабельдегі шығындарға байланысты [82].

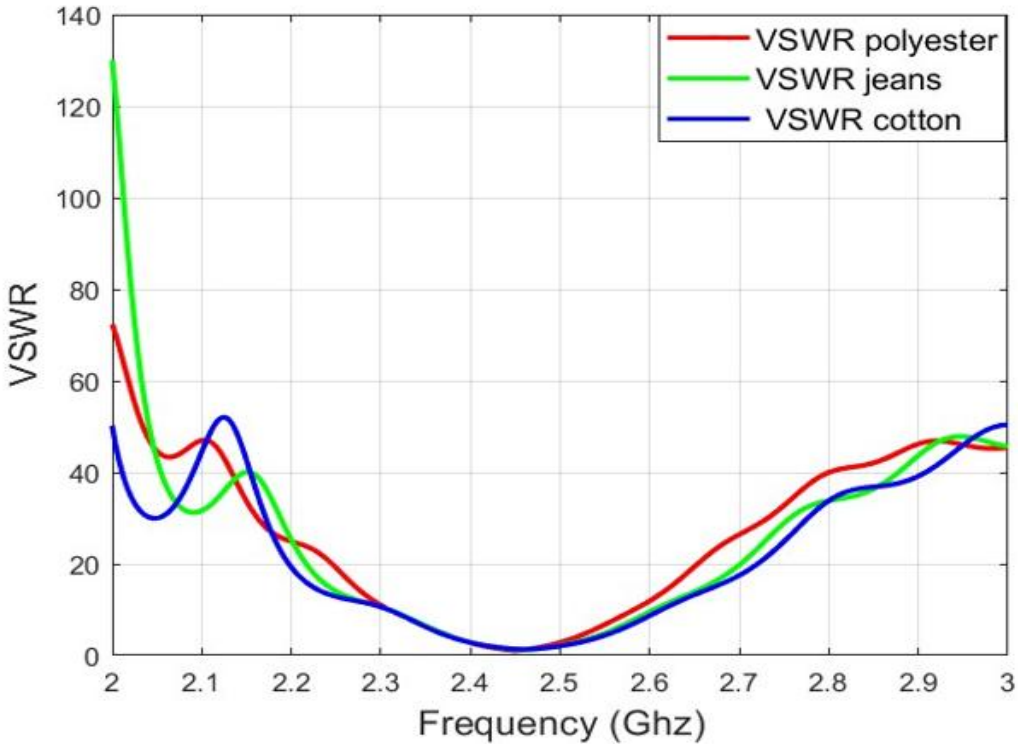
Яги–Уда антеннасының нысаналы жиілікке дәл келуін сандық бағалау үшін резонанстық жиіліктің салыстырмалы қателігі есептелді. Шағылысу коэффициентінен айырмашылығы, резонанстық жиілік үшін нақты эталондық мән бар – жобалаудың нысаналы жұмыс жиілігі $f_0 = 2{,}45$ ГГц (ISM диапазонының номиналды мәні), осы мәнге қатысты қателікті анықтау орынды. Резонанстық жиіліктің салыстырмалы қателігі өлшенген резонанстық жиіліктің нысаналы жиіліктен ауытқу модулінің нысаналы мәнге қатынасы ретінде есептеледі:

$$\delta_f = \frac{|f_{\text{изм}} - f_0|}{f_0} \cdot 100\% \qquad (23)$$

Үш прототиптің S11 сипаттамасы NanoVNA анализаторымен өлшенді. Нысаналы 2,45 ГГц жиіліктен ең үлкен ауытқу мақта мата төсенішінде байқалды:

резонанс 2,48 ГГц-те, δf = 1,22 %. Полиэстердегі антеннаның резонансы 2,43 ГГц (δf = 0,82 %). Джинс матасындағы антеннаның резонансы өлшеу қадамының дәлдігімен 2,45 ГГц-ке сәйкес келді. Үш жағдайда да резонанс ISM диапазонының (2,4–2,4835 ГГц) ішінде қалды. Мұндай аз ауытқу (1,3 %-дан төмен) әзірленген антеннаның нысаналы 2,45 ГГц ISM диапазонына жоғары дәлдікпен сәйкестігін және қолданылған жобалау әдістемесінің дұрыстығын растайды. Резонанстық жиіліктің байқалған ығысуы, сондай-ақ модельдеу мен эксперимент нәтижелері арасындағы $S_{11}$ резонанстық минимумының тереңдігі бойынша айырмашылықтар антеннаны қолмен дайындау процесіндегі қателіктерге, SMA жалғағышының тұрақсыз жұмысына және коаксиалды кабельдегі шығындарға байланысты; бұл ретте жұмысқа қабілеттіліктің негізгі өлшемшарты минимум тереңдігінің дәл сәйкес келуі емес, $S_{11} \leq -10$ dB сәйкестендіру шартының орындалуы болып табылады.

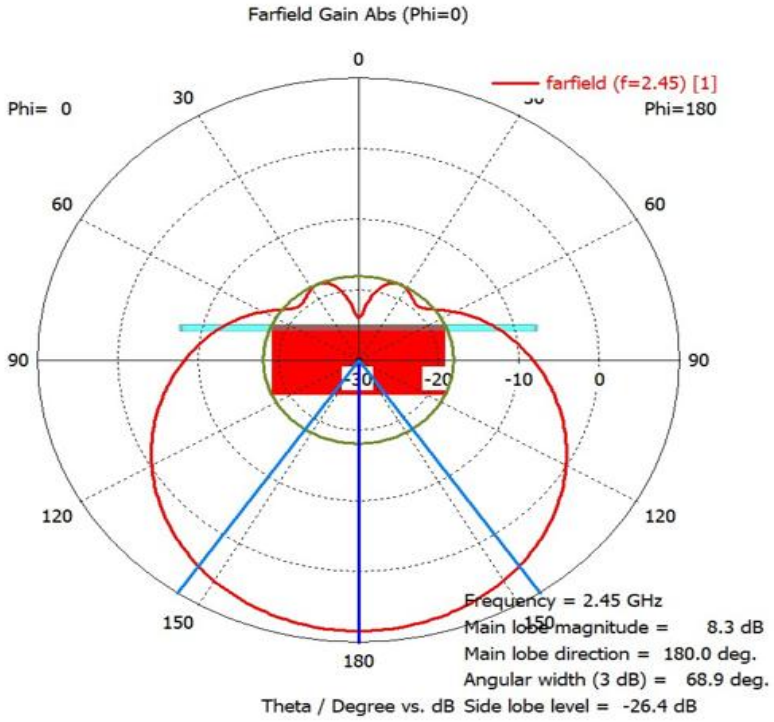
Радиоқұрылғыдан антеннаға қуатты тиімді беру үшін радиоқұрылғы, тарату желісі және антенна арасындағы импеданстардың жақсы сәйкестігін қамтамасыз ету аса маңызды. Кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті (КТТК) антенна импедансының оған қосылған тарату желісімен сәйкестік дәрежесін сипаттайды. Оңтайлы жұмыс істеу үшін КТТК мәні 1-ден 2-ге дейінгі аралықта болуы тиіс. Мақта мата, полиэстер және джинс төсеніштері үшін алынған КТТК мәндері тиісінше 1,39, 1,04 және 1,26 құрайды. Үш зерттелген төсеніш үшін КТТК тәуелділіктері 34-суретте көрсетілген.



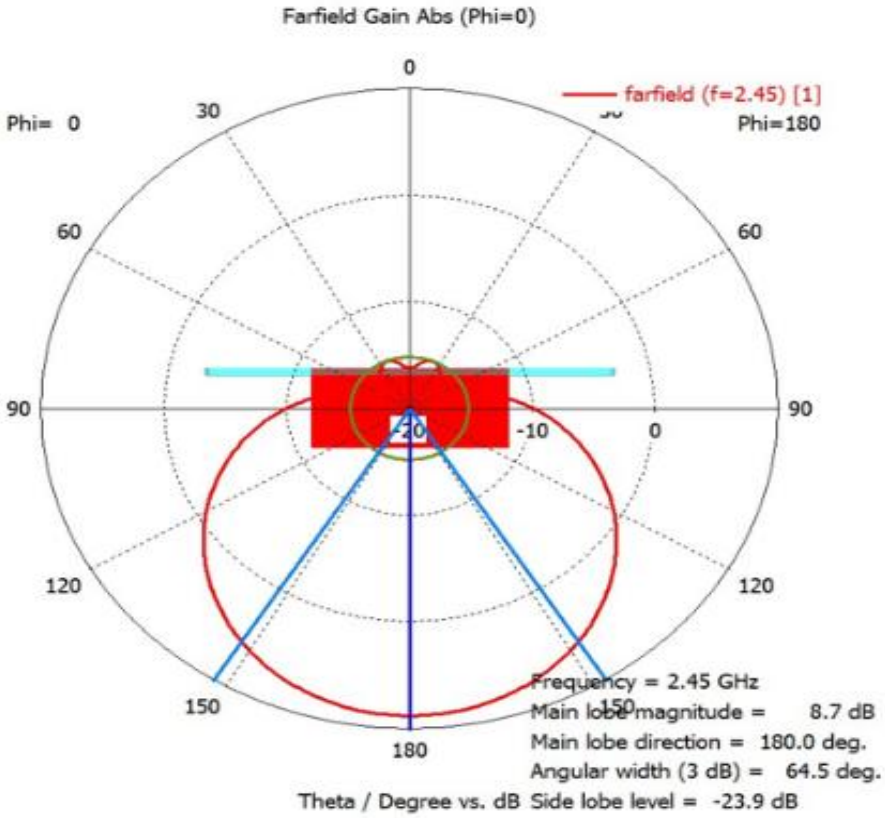

34 сурет – Үш төсенішке арналған Яги–Уда антеннасының КТТК [82]

Сәулелену диаграммасы антенна шығаратын өрістің кеңістікте таралуын сипаттайды. Полиэстер, мақта мата және джинс төсеніштері үшін модельдеу

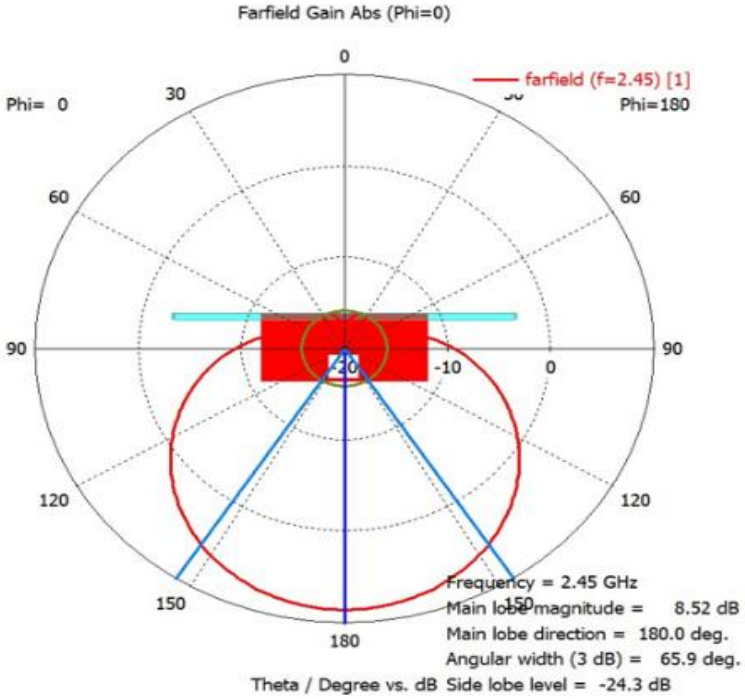
нәтижесінде алынған екіөлшемді сәулелену диаграммалары 35-37-суреттерде көрсетілген.




35 сурет – Полиэстер төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының сәулелену диаграммалары [82]




36 сурет – Мақта мата төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының сәулелену диаграммалары [82]




37 сурет – Джинс төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының сәулелену диаграммалары [82]

35-37-суреттерден көрініп тұрғандай, барлық жағдайларда сәулелену диаграммасының негізгі жапырақшасы шамамен 180° бағытына бағдарланған, яғни сәулелену максимумы антенна жазықтығына нормаль бойынша (broadside) бағытталған. Джинс төсеніші үшін антеннаның күшейту коэффициенті 8,5 dBi, мақта мата төсеніші үшін – 8,7 dBi, полиэстер төсеніші үшін – 8,3 dBi құрайды. Бағыттылық коэффициентінің мәндері джинс төсеніші үшін 9,1 dB, мақта мата төсеніші үшін 9,3 dB және полиэстер төсеніші үшін 8,8 dB құрайды; бұл ретте (15) қатынасы бойынша есептелген антеннаның радиациялық тиімділігі төсенішке байланысты 87-89 % аралығында болады [82]. Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі 1,45-тен (мақта мата) 1,6-ға (джинс) және 1,9-ға (полиэстер) дейін артқанда бағыттылық коэффициенті 9,3-тен 8,8 dBi-ге, күшейту коэффициенті 8,7-ден 8,3 dBi-ге төмендеп, негізгі жапырақшаның ені 64,5°-тан 65,9°-қа және 68,9°-қа дейін кеңейеді; бұл антенна торында байқалған тенденциямен сәйкес келеді (3.4-бөлім). Үш текстильді төсеніш үшін Яги–Уда антеннасын модельдеудің жинақталған нәтижелері 11-кестеде келтірілген.

Ұсынылған жазық Яги–Уда антеннасының жұмыс принципі классикалық сымды Яги–Уда антеннасынан ерекшеленеді. Классикалық антеннада элементтер бос кеңістікте орналасқан сымдар болып табылады және сәулелену антенна осінің бойымен бағытталады. Ұсынылған конструкцияда барлық элементтер жерге тұйықтау қабаты бар текстильді төсеніштің бетінде орналасқан. Әрбір элемент микрожолақты сәулелендіргіш ретінде жұмыс істейді, ал жерге тұйықтау қабаты сәулелену төсеніш жазықтығына нормаль бағытқа қарай шоғырландырады. Сондықтан сәулелену максимумы антенна жазықтығына перпендикуляр бағытта байқалады.

Белсенді элемент қоректендіру желісі арқылы тікелей қоздырылады, ал рефлектор мен директорлар қоректендірілмейді. Олар белсенді элементпен шеткі өрістер арқылы байланысады және өздерінде индукцияланған токтар есебінен сәулеленуге қатысады. Пассивті элементтердің ұзындығы белсенді элементке қатысты сәл кіші (директорлар) немесе сәл үлкен (рефлектор) етіп таңдалғандықтан, олардағы токтардың фазасы мен амплитудасы әртүрлі болады. Нәтижесінде антеннаның тиімді сәулелендіретін ауданы бір патчпен салыстырғанда ұлғаяды, бұл бағыттылық пен күшейту коэффициентінің артуына әкеледі.

Элементтер арасындағы саңылау байланыс деңгейін анықтайды. Саңылау тым кең болса, пассивті элементтер әлсіз қозады және олардың сәулеленуге қосатын үлесі аз болады. Саңылау тым тар болса, элементтер арасындағы байланыс күшейіп, резонанстық жиілік пен кіріс кедергісі өзгереді, ал бұл сәйкестендіруді қиындатады. Сондықтан саңылау мен элементтер ұзындықтарының арақатынасы оңтайландыру кезінде бірге таңдалды.

Конструкцияның маңызды артықшылығы – барлық элементтердің бір өткізгіш қабатта орналасуы. Мұндай құрылым көпқабатты қоректендіру желісін, тесіктерді және қабаттарды дәл қиыстыруды қажет етпейді, сондықтан оны матада дайындау жеңіл және иілу кезінде қабаттардың ажырауы немесе ығысуы сияқты ақаулар болмайды. Антенна торымен салыстырғанда Яги–Уда антеннасында тек бір элемент қоректендіріледі, яғни қуатты бөлетін желі жоқ. Бұл қоректендіру тізбегін қарапайымдатады және ондағы шығындарды азайтуы мүмкін, бірақ бұл мәселе осы жұмыста жеке зерттелмеді.

Үш төсеніште алынған нәтижелерді салыстыру Яги–Уда антеннасында да төсеніш өтімділігінің әсері антенна торындағы сияқты екенін көрсетеді: өтімділік артқан сайын элементтердің электрлік өлшемдері кішірейіп, бағыттылық пен күшейту коэффициенті біртіндеп төмендейді, ал негізгі жапырақша кеңейеді. Төсеніштердің ішінде полиэстер ең ықшам антенна береді, ал мақта мата ең жоғары күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді. Бұл нәтиже төсеніш таңдауда антенна өлшемі мен күшейту коэффициенті арасында ымыраға келу қажеттігін тағы да растайды.

11 кесте – Яги – Уда антеннасын модельдеудің жинақталған нәтижелері

| Төсеніш | $S_{11}$ модел., dB | $S_{11}$ эксп., dB | КТТК | КК, dBi | Бағыт, dBi | КПД, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Полиэстер | –33,9 | –14,9 | 1,04 | 8,3 | 8,8 | 89,1 |
| Джинс | –20,1 | –10,84 | 1,26 | 8,5 | 9,1 | 87,1 |
| Мақта мата | –12,9 | –6,1 | 1,39 | 8,7 | 9,3 | 87,1 |

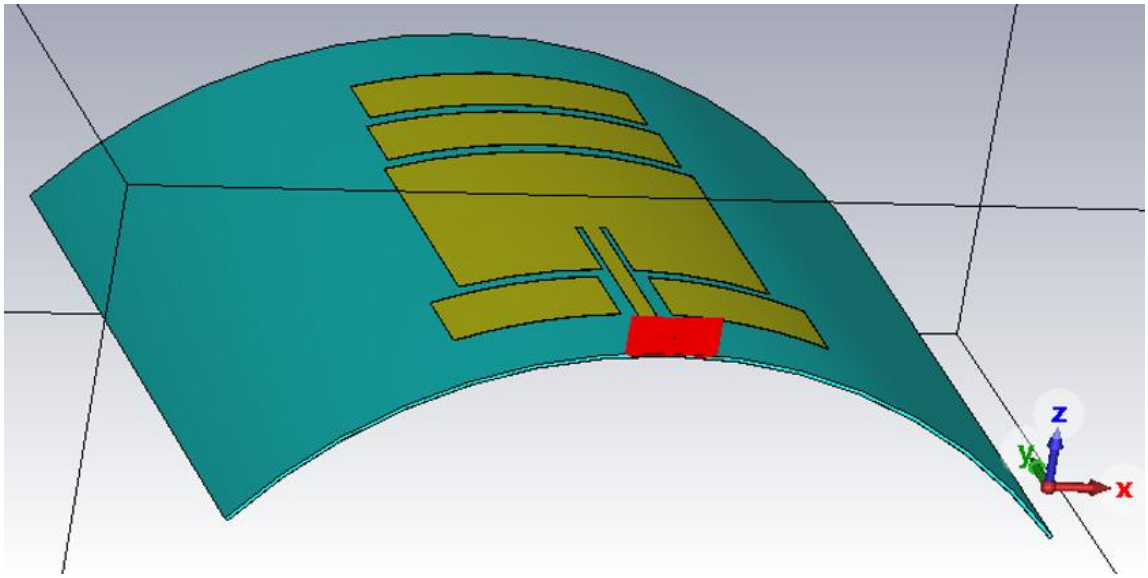
11-кестеден көрініп тұрғандай, зерттелген үш төсеніштің барлығы 2,45 ГГц ISM диапазонында Яги–Уда антеннасының қанағаттанарлық сипаттамаларын қамтамасыз етеді; бұл ретте ең жақсы сәйкестендіруді (модельдеу кезіндегі ең аз шағылысу коэффициентін) полиэстер төсеніші қамтамасыз етеді (–33,9 dB), ал

күшейту және бағыттылық коэффициенттерінің ең жоғары мәндеріне мақта мата төсенішінде қол жеткізіледі (тиісінше 8,7 dBi және 9,3 dB). Әзірленген киетін Яги–Уда антеннасы икемділігін және денеге орналастыруға жарамдылығын сақтай отырып, жоғары күшейту коэффициентімен бағытталған сәулеленуді қамтамасыз ететіні қорғауға ұсынылатын 2-қағиданы дәлелдейді.

### 4.2 Антеннаның механикалық деформацияларға төзімділігін зерттеу

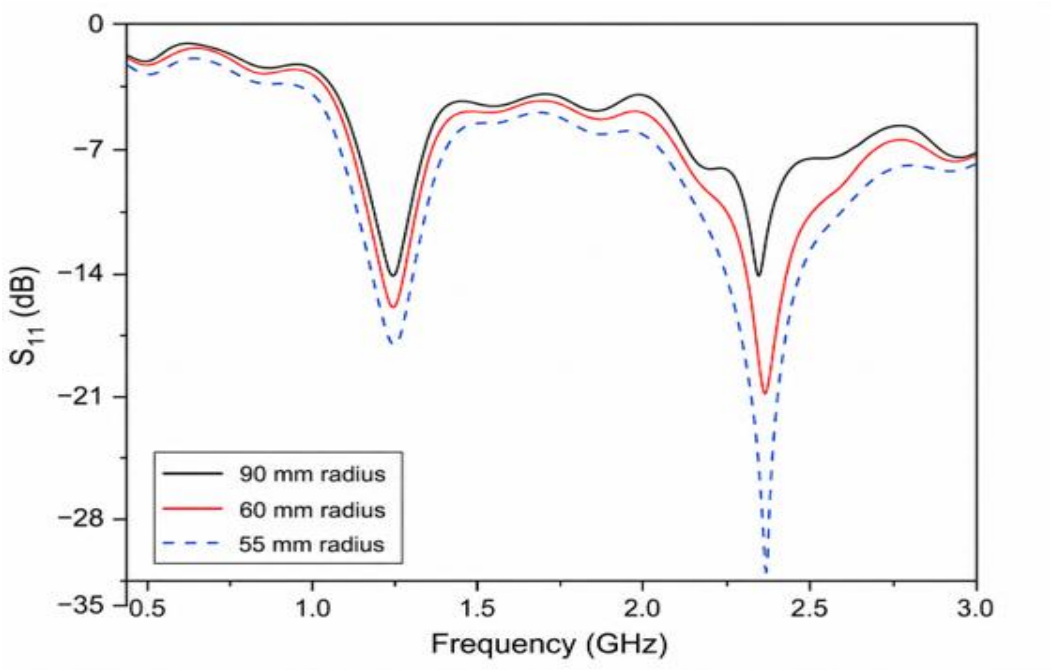
Екі элементті сызықтық антенна торы үшін жүргізілген зерттеуге (3.2-бөлім) ұқсас, киетін Яги–Уда антеннасының иілуге және механикалық деформацияларға төзімділігі зерттелді, өйткені киетін антеннаны нақты пайдалану жағдайында адам денесінің қисық беттеріне (білек, иық) орналастыру қажет және ол деформацияға ұшырайды.

Яги–Уда антеннасының деформацияланған күйін модельдеу CST Studio Suite бағдарламалық кешенінде конструкцияны қисықтық радиустары 90 мм, 60 мм және 55 мм болатын цилиндрлік беттерге орналастыру арқылы жүргізілді. Бұл мәндер антеннаны адам денесінің аяқ-қолдарына орналастыру кезіндегі иілудің тән радиустарына сәйкес келеді. Цилиндрлік бетке орналастырылған иілген Яги–Уда антеннасының моделі 38-суретте көрсетілген.




38 сурет – Цилиндрлік беттегі иілген Яги–Уда антеннасының моделі

Зерттелген қисықтық радиустарының әрқайсысы үшін жиілік диапазонындағы шағылысу коэффициенті $S_{11}$ тіркелді. Антеннаны 90, 60 және 55 мм радиустарда иілу кезіндегі шағылысу коэффициенті $S_{11}$-дің жиілікке тәуелділігінің модельдеу нәтижелері 39 суретте көрсетілген.




39 сурет – 55, 60, 90 мм радиустарда иілген Яги-Уда антеннасының $S_{11}$

39 суреттен көрініп тұрғандай, Яги–Уда антеннасы зерттелген барлық иілу радиустарында 2,4 ГГц маңындағы нысаналы диапазонда резонанстық сипаттамасын сақтайды. Қисықтық радиусының азаюымен резонанстың тереңдеуі байқалады: ең терең сәйкестендіруге (шамамен –33 dB) ең кіші 55 мм иілу радиусында қол жеткізіледі, ал 60 мм және 90 мм радиустарда $S_{11}$ минимумы тиісінше шамамен –21 dB және –15 dB құрайды. Зерттелген иілу диапазонының барлық жағдайында жұмыс жиілігіндегі шағылысу коэффициенті шекті –10 dB мәнінен едәуір төмен деңгейде сақталады, бұл механикалық деформация кезінде антеннаның импеданстық сәйкестендіруінің тұрақтылығын көрсетеді.

Иілу кезіндегі Яги–Уда антеннасын модельдеудің жинақталған нәтижелері 12-кестеде келтірілген. Салыстыру үшін жазық (деформацияланбаған) күйде шағылысу коэффициентінің минимумы текстильді төсенішке байланысты –12,9-дан –33,9 dB-ге дейін өзгереді (11-кесте).

12 кесте – Полиэстер төсенішіндегі Яги–Уда антеннасының иілу нәтижелері

| Иілу радиусы, мм | Резонанстық жиілік, ГГц | Жиіліктің ығысуы, МГц | Салыстырмалы ығысу, % |
|---|---|---|---|
| Жазық күй | 2,45 | 0 | 0 |
| 90 | 2,34 | –110 | –4,5 |
| 60 | 2,36 | –90 | –3,7 |
| 55 | 2,36 | –90 | –3,7 |

Яги–Уда антеннасын 90, 60 және 55 мм радиуспен иген кезде резонанс 2,34–2,36 ГГц-ке дейін, яғни 3,7–4,5 %-ға төмендеді (12-кесте). Торда бұл ығысу 5,3–10,5 % болған (8-кесте). Резонанстық қасиеттер бірнеше элементке бөлінгендіктен, Яги–Уда антеннасы иілуге аз сезімтал болуы мүмкін. Алайда бұл

салыстыру шартты: Яги–Уда антеннасының иілуі тек модельдеуде қарастырылды, ал тор прототипте өлшенді. Оның үстіне иілген күйде резонанс ISM диапазонының төменгі шекарасынан (2,4 ГГц) төмен түседі. Нақты киімде қолдану үшін бастапқы резонансты жоғарырақ жиілікке ығыстыру қажет болады.

Модельдеуде барлық иілу радиустарында негізгі резонанспен қатар 1,2–1,3 ГГц аралығында тағы бір резонанс пайда болды. Ол директорлар мен рефлектордың әсерінен туындауы мүмкін. Бұл болжамды тексеру үшін пассивті элементтерді кезекпен алып тастап модельдеу керек, мұндай есептеу әлі жүргізілген жоқ.

Зерттелген барлық радиуста $S_{11}$ минимумы −10 dB-ден төмен болып қалды (55 мм-де шамамен −33 dB, 60 мм-де −21 dB, 90 мм-де −15 dB), яғни иілген антеннаның сәйкестендіруі сақталды. Алайда резонанс ISM 2,4–2,4835 ГГц диапазонының төменгі шегінен сәл төмен ығысты, сондықтан денеге орналастыруға арналған нұсқада бастапқы резонансты жоғарырақ жиілікке орналастыру қажет.

Иілу кезінде сипаттамалары сақталатын текстильді антенналар басқа жұмыстарда да сипатталған. [25] жұмыста текстильді төсеніштегі патч-антенналардың резонанстық сипаттамалары иілгенде тұрақты болған.

Фетрдегі екі элементті MIMO-антеннаның тәжірибелік зерттеуі [109] де осындай нәтиже көрсеткен. Антенна X және Y осьтері бойынша 25–65 мм радиустағы цилиндрлік беттерге орналастырылғанда оның күшейту коэффициенті 16 %-дан аспайтын шамаға төмендеген, ал жұмыс жолағы 2,45 ГГц ISM диапазонында қалған.

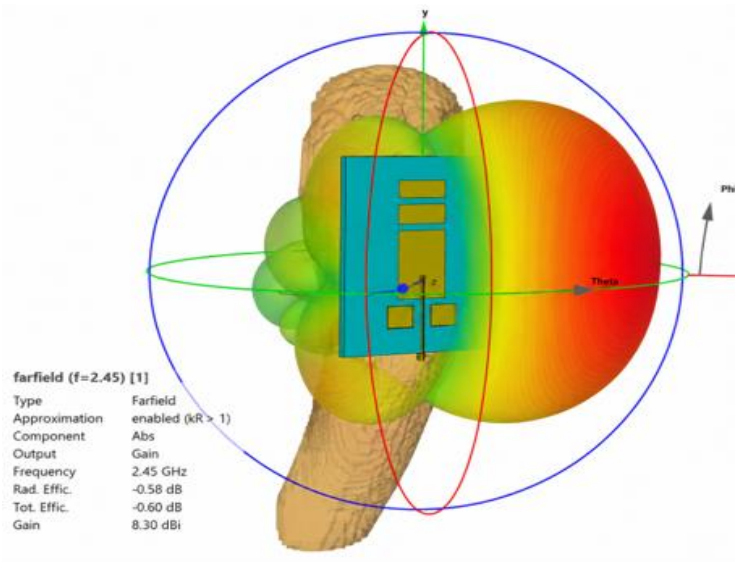
Яги–Уда антеннасы иілгенде оның сипаттамаларына әсер ететін механизмдер антенна торындағыдан біршама өзгеше. Яги–Уда антеннасында элементтер бір-бірімен шеткі өрістер арқылы байланысатындықтан, иілу кезінде элементтердің өзара орналасуы мен олардың арасындағы саңылаулардың тиімді мөлшері өзгереді. Бұл белсенді элемент пен пассивті элементтер арасындағы байланысқа әсер етеді. Сонымен бірге элементтердің әрқайсысының тиімді ұзындығы өзгеріп, резонанстық жиілік төмен қарай ығысады.

Иілген күйде негізгі резонанспен қатар төменгі жиілікте пайда болатын қосымша резонанс құрылымның көп элементті екенімен байланысты. Жазық күйде пассивті элементтердің резонанстары негізгі резонансқа әсер етпейтін аймақта болады, ал иілу кезінде элементтер арасындағы байланыс өзгеріп, олардың әсері шағылу коэффициентінің жиілікке тәуелділігінде байқала бастайды. Бұл қосымша резонанс жұмыс жиілігінен алыс орналасқандықтан, антеннаның 2,45 ГГц маңындағы жұмысына әсер етпейді.

Яги–Уда антеннасында иілу кезіндегі жиілік ығысуының антенна торымен салыстырғанда аз болуы оның геометриясымен байланысты болуы мүмкін. Алайда екі антеннаның иілу нәтижелері әртүрлі тәсілмен алынғанын ескеру қажет: антенна торы үшін өлшеу жүргізілді, ал Яги–Уда антеннасы үшін нәтижелер модельдеу арқылы алынды. Өлшеуде дайындау мен бекіту жағдайларының әсері болатындықтан, екі антеннаның иілуге төзімділігін тікелей салыстыру шектеулі.

### 4.3 Антеннаның электромагниттік қауіпсіздігін бағалау

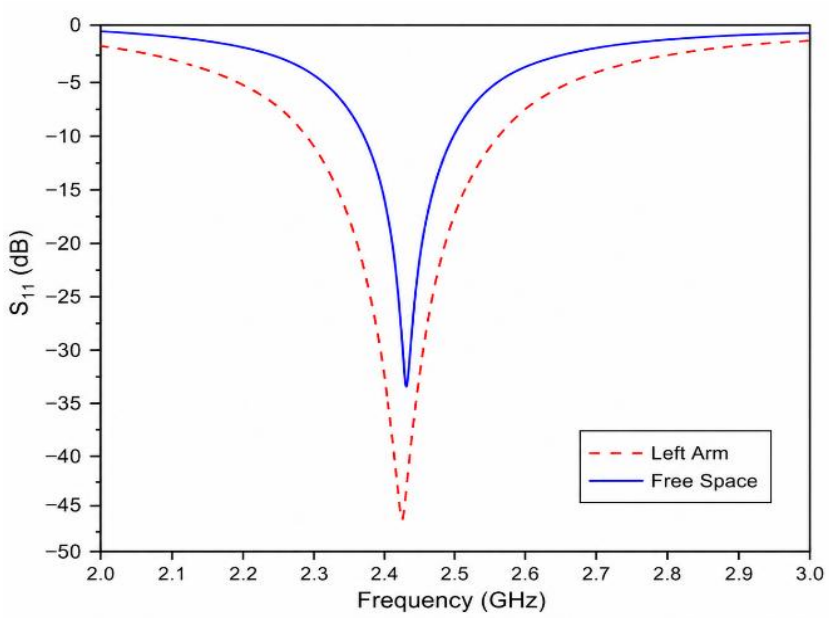
Яги–Уда антеннасының МЖК-сы антенна торындағыдай әдістемемен (3.3-бөлім) CST Studio Suite бағдарламасында адам денесінің воксельдік моделі арқылы есептелді. Антенна білекке антенна торындағыдай 5 мм қашықтықта орналастырылды. 2,45 ГГц жиіліктегі воксельдік модельдегі антеннаның сәулелену диаграммасы 40 суретте көрсетілген.




40 сурет – Адам денесінің воксельдік моделіндегі Яги-Уда антеннасының сәулелену диаграммасы

40 суреттен көрініп тұрғандай, адам денесіне орналастырылған кезде Яги–Уда антеннасы 8,30 dBi іске асырылған күшейту коэффициентімен сәулелену сипатын сақтайды; радиациялық тиімділік –0,58 dB, ал толық тиімділік –0,60 dB құрайды. Дене тіндерінің болуы жұтылу және шашырау салдарынан сәулелену диаграммасының симметриясын біршама бұрмалайды, алайда негізгі жапырақшаның бағыты сақталады.

Антеннаны қолға (сол қолға) орналастыру және еркін кеңістікте орналастыру жағдайлары үшін шағылысу коэффициенті $S_{11}$ жиілікке тәуелділігінің модельдеу нәтижелерін салыстыру 41 суретте көрсетілген.

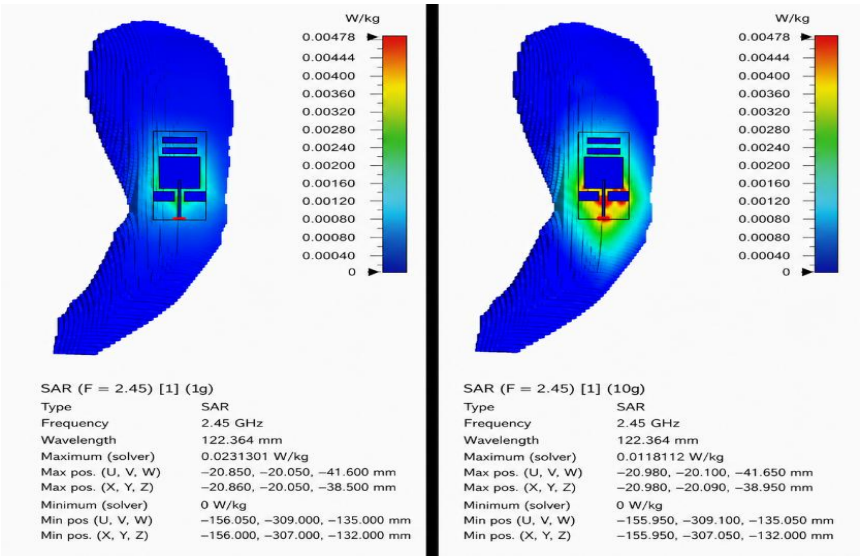



41 сурет – Адам денесіне және еркін кеңістікте орналастырылған Яги–Уда антеннасының $S_{11}$

Денеге жақын орналасқанда Яги–Уда антеннасының сәйкестендіруі өзгереді (41 сурет): $S_{11}$ минимумы еркін кеңістіктегі шамамен −33 dB-ден −46 dB-ге дейін тереңдейді, ал резонанстық жиілік шамамен 2,43 ГГц-тен 5 МГц-ке төмен ығысады. Бұл дене тіндерінің әсерінен антеннаның жақын өрісіндегі тиімді диэлектрлік өтімділіктің өзгеруімен түсіндіріледі. Резонанс екі жағдайда да ISM 2,4–2,4835 ГГц диапазонында қалады.

Антенна торында да (3.3-бөлім) денеге орналастырғанда $S_{11}$ минимумы тереңдеп, резонанс 10 МГц шамасында ығысқан, бірақ жоғары қарай. Демек, екі антеннада да денеге жақындық сәйкестендіруді нашарлатпайды және резонансты жұмыс диапазонынан шығармайды.

2,45 ГГц жиіліктегі білек тіндеріндегі МЖК таралуы 42-суретте көрсетілген.




42 сурет – Яги – Уда антеннасының МЖК таралуы: 1 г (сол жақта) және 10 г (оң жақта)

42 суретте көрінгендей, МЖК-ның ең жоғары мәндері белсенді элементтің қоректендіру желісі маңындағы тіндерде пайда болады және антеннадан алыстаған сайын азаяды. 2,45 ГГц жиілікте модельдеу бойынша МЖК-ның максималды мәні 1 г тінге орташалағанда 0,0231 Вт/кг, 10 г тінге орташалағанда 0,0118 Вт/кг болды. Бұл FCC (1 г тінге 1,6 Вт/кг) шегінен шамамен 70 есе, ICNIRP (10 г тінге 2,0 Вт/кг) шегінен шамамен 170 есе төмен. Антенна торындағыдай, МЖК-ның төмен болуы тұтас жерге тұйықтау қабатымен байланысты, ол денеге қарай бағытталған сәулеленудің бір бөлігін экрандайды.

1г тінге орташаланған МЖК бойынша Яги–Уда антеннасының мәні антенна торынікінен шамамен 4,5 есе жоғары (0,0231 және 0,0051 Вт/кг), ал 10 г тін бойынша керісінше төмен (0,0118 және 0,0156 Вт/кг). Демек, Яги–Уда антеннасында жұтылу кішірек көлемде, қоректендіру желісі маңында шоғырланған. Мұның себебі желінің тіндерге жақын орналасуы болуы мүмкін, бірақ бұл жұмыста бөлек зерттелмеді.

Соған қарамастан, екі конструкция үшін де есептелген МЖК мәндері белгіленген нормативтік шектерден айтарлықтай төмен болып қалды. Осыған байланысты әзірленген антенналардың электромагниттік қауіпсіздік талаптарына сәйкес келетіні туралы қорытынды жасауға болады.

Антенна адам денесіне жақын орналастырылғанда оның сипаттамаларының өзгеруі дене тіндерінің электрлік қасиеттерімен байланысты. Тіндердің құрамында су көп болғандықтан, олардың диэлектрлік өтімділігі мен өткізгіштігі жоғары. Антеннаның маңындағы өріс тіндерге енген кезде антеннаның тиімді ортасы өзгереді, бұл резонанстық жиіліктің ығысуына және кіріс кедергісінің өзгеруіне әкеледі. Сонымен қатар, тіндерде қуаттың бір бөлігі жұтылатындықтан, денеде орналасқан антеннаның тиімділігі еркін кеңістіктегіге қарағанда төмендейді.

Ұсынылған Яги–Уда антеннасында денеге орналастырған кезде резонанстың аз ғана ығысуы жерге тұйықтау қабатының экрандаушы әсерімен түсіндіріледі. Бұл қабат сәулелендіргіштердің өрісін дене тіндерінен ішінара оқшаулайды, сондықтан дене антеннаның жұмыс режиміне шамалы әсер етеді. Бұл киетін антенна үшін маңызды қасиет, өйткені антенна адамның қозғалысы кезінде денеге әртүрлі қашықтықта орналасуы мүмкін, ал оның жұмыс жиілігі тұрақты қалуы тиіс.

МЖК таралуының қоректендіру желісі маңында шоғырлануы тоқтың ең үлкен мәндері осы аймақта болатынымен байланысты. Бұл нәтиже практикалық тұрғыдан маңызды: антеннаны киімге орналастыру кезінде қоректендіру нүктесін денеден барынша алыс немесе қосымша мата қабаты арқылы орналастыру тіндердегі жергілікті жұтылуды одан әрі азайтуға мүмкіндік береді.

### *4 – бөлім бойынша қорытынды*

Текстильді төсеніште активті элементті, рефлекторды және екі директорды қамтитын киетін микрожолақты Яги–Уда антеннасы әзірленіп, оңтайландырылды. Зерттелген үш текстильді төсеніш үшін (джинс мата, мақта мата, полиэстер) антенна жазықтығына нормаль бойынша (broadside)

бағытталған сәулелену диаграммасын және 87-89 % радиациялық тиімділік кезінде 8,3–8,7 dBi жоғары күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді. Антенна элементтерінің геометриялық параметрлерінің жоғары күшейту коэффициентін қамтамасыз ететін оңтайлы арақатынастары анықталды ($k_D \approx 0,95$, $k_R \approx 1,10$). Яги–Уда антеннасының иілуге тұрақтылығы зерттелді: конструкция 55-90 мм қисықтық радиустарында иілген кезде импеданстық сәйкестендіруін сақтайды, ал резонанстық жиілігі 3,7–4,5 %-ға ығысады. Электромагниттік қауіпсіздікті бағалау нәтижесінде 1г тінге орташаланған МЖК 0,0231 Вт/кг, ал 10г тінге орташаланған МЖК 0,0118 Вт/кг құрайтыны анықталды, бұл FCC және ICNIRP белгілеген нормативтік шектерден едәуір төмен. Бұл зерттеу нәтижелері автордың [82, 121] ғылыми жұмыстарында жарияланған.

Осы бөлімде алынған нәтижелер қорғауға ұсынылатын 2-қағиданың орындалғанын растайды, яғни текстильді төсеніштегі Яги–Уда антеннасының ұсынылған топологиясы 8,3–8,7 dBi күшейту коэффициентіне қол жеткізе отырып, белгілі текстильді бағытталған антенналардың көрсеткіштерінен асып түседі.

## 5 Екі элементті сызықтық антенна торы мен яги–уда антеннасының сипаттамаларын салыстыру

Алдыңғы тарауларда 2,45 ГГц ISM диапазонында жұмыс істеуге арналған текстильді төсеніштердегі екі түрлі киетін микрожолақты антеннасы әзірленіп, оңтайландырылып және эксперименттік жолмен зерттелді. Екі конструкция да текстильді төсеніштерде микрожолақты сызықтық қоректендіруді қолдану арқылы орындалды, иілуге төзімділігі зерттелді және электромагниттік қауіпсіздігі бірыңғай әдістеме бойынша бағаланды. Бұл екі топологияның электродинамикалық сипаттамаларын бірдей жұмыс жиілігінде және бірдей төсеніш материалдарында салыстыруға мүмкіндік береді. Текстильді киетін антенналардың алдын ала салыстыруы автордың [122] жұмысында жарияланған.

Антенналар сәулелену диаграммасының түрі, бағыттылық коэффициенті, күшейту коэффициенті, негізгі жапырақшаның ені және радиациялық тиімділік бойынша салыстырылды (13-кесте). Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігінің әсерін көрсету үшін кестеде сипаттамалар εr = 1,45 (антенна торы үшін фетр, Яги–Уда антеннасы үшін мақта мата), $\varepsilon_r$ = 1,6 (джинс матасы) және $\varepsilon_r$ = 1,9 (полиэстер) реті бойынша берілген. Антенна торы үшін ток өткізгіш матасы бар конфигурациялардың мәндері келтірілген; мыс таспасы бар конфигурацияларда тенденция бірдей (7-кесте). Салыстыру кезінде антенналардың өткізгіш материалдары әртүрлі екенін ескеру қажет: антенна торында мыс таспа мен ток өткізгіш мата, Яги–Уда антеннасында күміс.

13 кесте – Антенна торы мен Яги–Уда антеннасының сипаттамаларын салыстырмалы талдау

| Электродинамикалық сипаттамалары | Екі элементті антенна торы | Яги–Уда антеннасы |
|---|---|---|
| Сәулелену диаграммасының түрі | кең (broadside) | кең (broadside) |
| Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі, εr | 1,45 → 1,6 → 1,9 | 1,45 → 1,6 → 1,9 |
| Бағыттылық коэффициенті, dBi | 9,06 → 8,92 → 8,73 | 9,3 → 9,1 → 8,8 |
| Күшейту коэффициенті, dBi | 3,33 → 2,56 → 0,86 | 8,7 → 8,5 → 8,3 |
| Негізгі жапырақшаның ені, ° | 58,4 → 59,5 → 61,8 | 64,5 → 65,9 → 68,9 |
| Сәулелену тиімділігі, % | 16–27 | 87–89 |
| Конструкциясы | 2 сәулелендіргіш, корпоративтік қоректендіру желісі | 4 элемент, тек белсенді элемент қоректенеді |

13-кестеден көрінетіндей, екі топологияның да сәулелену максимумы антенна жазықтығына нормаль бойынша (broadside) бағытталған: антенна торында θ = 0°, Яги–Уда антеннасында θ = 180° (16–21 және 35–37 суреттер).

Негізгі жапырақшаның ені антенна торында 58,4–61,8°, Яги–Уда антеннасында 64,5–68,9° құрайды. Екі топологияның бағыттылық коэффициенттері жақын (8,73–9,06 және 8,8–9,3 dBi) және жалғыз патчтың 7,02–7,58 dBi [123] мәнінен жоғары.

Салыстырудың негізгі нәтижесі – төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігінің әсер ету заңдылығы екі топологияда да бірдей. εr 1,45-тен 1,6-ға және 1,9-ға дейін артқанда антенна торында бағыттылық коэффициенті 9,06-дан 8,73 dBi-ге, күшейту коэффициенті 3,33-тен 0,86 dBi-ге төмендеп, негізгі жапырақша 58,4°-тан 61,8°-қа дейін кеңейеді; Яги–Уда антеннасында бағыттылық 9,3-тен 8,8 dBi-ге, күшейту коэффициенті 8,7-ден 8,3 dBi-ге төмендеп, жапырақша 64,5°-тан 68,9°-қа дейін кеңейеді (13-кесте). Бұл тәуелділік микрожолақты антенналар теориясымен сәйкес келеді: εr артқан сайын сәулелендіргіштің электрлік өлшемдері кішірейеді, сондықтан бағыттылық төмендеп, жапырақша кеңейеді [10, 47]. Яги–Уда антеннасында мақта матадан полиэстерге өткенде tgδ 0,04-тен 0,0045-ке дейін азайса да күшейту коэффициенті төмендейді, яғни бұл тенденцияны диэлектрлік шығындармен түсіндіруге болмайды. Демек, төсеніштің εr әсер ету заңдылығы топологияға тәуелсіз.

Екі конструкцияның бағыттылық коэффициенттері бір-біріне жақын мәндер көрсетті. Антенна торында бұл көрсеткіш 8,73–9,06 dBi аралығында болса, Яги–Уда антеннасында 8,8–9,3 dBi аралығында болды. Соған қарамастан, нақты күшейту коэффициенттерінің арасында 5–7 dB айырмашылық байқалады. Антенна торы үшін оның мәні 0,86–3,33 dBi, ал Яги–Уда антеннасы үшін 8,3–8,7 dBi болды.

Бұл айырмашылықты бағыттылықпен түсіндіруге болмайды: екі антеннаның бағыттылық коэффициенті іс жүзінде бірдей (антенна торында 8,73–9,06 dBi, Яги–Уда антеннасында 8,8–9,3 dBi, 13-кесте). Күшейту коэффициенті бағыттылық пен радиациялық тиімділіктің көбейтіндісіне тең болғандықтан ($G = D \cdot \eta$), шамамен 5–7 dB айырмашылықтың негізгі бөлігі тиімділікке байланысты: антенна торында ол 16–27 %, Яги–Уда антеннасында 87–89 %.

Тиімділіктің мұндай айырмашылығының себебі бұл жұмыста толық анықталмады. Оны тек төсеніш материалымен түсіндіруге болмайды, өйткені екі антенна да джинс матасы мен полиэстерде зерттелді. Өткізгіш материалымен де түсіндіруге болмайды, өйткені антенна торында мыс таспа мен ток өткізгіш мата бірдей тиімділік берді (фетрде 26,3 және 26,7 %, джинс матасында 23,2 және 23,1 %). Ықтимал себептер: антенна торындағы корпоративтік қоректендіру желісінің шығындары, сондай-ақ модельдеуде Яги–Уда элементтері үшін күміс, ал антенна торы үшін мыс таспа мен ток өткізгіш мата қолданылуы. Бұл факторлардың үлесін анықтау үшін екі антеннаны бірдей өткізгішпен қосымша модельдеу қажет.

Антенна торы екі бірдей сәулелендіргіштен және симметриялы корпоративтік қоректендіру желісінен тұрады. Яги–Уда антеннасында төрт элемент бар (белсенді элемент, рефлектор және екі директор), олардың ұзындықтары $k_D \approx 0{,}95$ және $k_R \approx 1{,}10$ қатынастарын сақтауы тиіс, сондықтан ол

дайындау дәлдігіне сезімталырақ және ауданы үлкенірек. Екі антенна да бір текстильді төсеніш қабатында жазық орындалады.

Анықталған заңдылықтың топологияға тәуелсіз болуы оның жалпы сипатын көрсетеді. Антенна торы мен Яги–Уда антеннасы құрылымы, элементтер саны, қоректендіру тәсілі және өткізгіш материалы бойынша ерекшеленеді. Соған қарамастан, төсеніштің өтімділігі өзгергенде екі антеннаның да сипаттамалары бір бағытта өзгереді. Бұл төсеніштің әсері белгілі бір конструкцияның ерекшелігі емес, текстильді төсеніштегі микрожолақты антенналарға ортақ қасиет екенін білдіреді.

Бұл нәтиженің практикалық маңызы мынада: әзірлеуші жаңа конструкцияны жобалағанда немесе бар конструкцияны басқа матаға көшіргенде сипаттамалардың өзгеру бағытын алдын ала болжай алады. Өтімділігі жоғарырақ матаға көшу антеннаны ықшамдайды, бірақ бағыттылық пен күшейту коэффициентінің төмендеуіне және диаграмманың кеңеюіне әкеледі. Өтімділігі төмен мата, керісінше, бағыттылықты арттырады, бірақ антенна өлшемін үлкейтеді. Осылайша, төсеніш таңдау антеннаның өлшемі мен сәулелену сипаттамалары арасындағы ымыраны анықтайды және бұл ымыра антенна топологиясына қарамастан бірдей сақталады.

Екі антеннаның бағыттылығы жақын болғанымен, олардың күшейту коэффициенттері айтарлықтай ерекшеленеді. Бұл айырмашылық бағыттылықпен емес, радиациялық тиімділікпен байланысты. Алайда тиімділік модельдеуде бағыттылық пен күшейту коэффициентінің қатынасы ретінде есептелгендіктен, бұл тұжырым тиімділік айырмашылығының себебін түсіндірмейді. Айырмашылыққа өткізгіш материалдардың түрі, қоректендіру тәсілі және төсеніштердің шығын тангенсі сияқты бірнеше фактор бірге әсер етуі мүмкін. Оларды жеке-жеке бағалау келесі зерттеулердің міндеті болып табылады.

Салыстыру нәтижелері жалпы алғанда текстильді төсеніштегі микрожолақты антенналарды жобалауда төсеніш материалын таңдау бірінші кезектегі шешім екенін көрсетеді. Топология антеннаның бағыттылығы мен күшейту деңгейін анықтайды, ал төсеніш осы көрсеткіштердің нақты мәндерін және олардың өзгеру бағытын анықтайды.

Салыстыру нәтижелерінің шектеулері мыналар. Біріншіден, сәулелену диаграммасы, бағыттылық, күшейту коэффициенті және радиациялық тиімділік тек модельдеу арқылы анықталды, ал тәжірибе жүзінде $S_{11}$ ғана өлшенді; сәулелену сипаттамаларын жаңғырықсыз камерада өлшеу келесі зерттеулерге қалдырылды. Екіншіден, төсеніштер тек $\varepsilon r$ бойынша емес, $tg\delta$ және қалыңдық $h$ бойынша да ерекшеленеді, сондықтан $\varepsilon r$ әсері басқа параметрлерден бөлек оқшауланбаған. Үшіншіден, антенналардың өткізгіш материалы әртүрлі, сондықтан тиімділік айырмашылығын тек топологиямен түсіндіруге болмайды.

### *5 – бөлім бойынша қорытынды*

Бесінші тарауда екі антенна сәулелену диаграммасының түрі, негізгі жапырақшаның ені, бағыттылық және күшейту коэффициенттері мен радиациялық тиімділік бойынша салыстырылды. Екі топологияның да сәулелену

максимумы антенна жазықтығына нормаль бойынша (broadside) бағытталған, бағыттылық коэффициенттері жақын (8,73–9,06 және 8,8–9,3 dBi), ал күшейту коэффициенттері (0,86–3,33 және 8,3–8,7 dBi) мен радиациялық тиімділік (16–27 және 87–89 %) айтарлықтай ерекшеленеді; тиімділік айырмашылығының себебі бұл жұмыста бөлек зерттелмеді. Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі 1,45-тен 1,9-ға дейін артқанда екі топологияда да бағыттылық пен күшейту коэффициенті төмендеп, негізгі жапырақша кеңейетіні (антенна торында 58,4°-тан 61,8°-қа, Яги–Уда антеннасында 64,5°-тан 68,9°-қа дейін) көрсетілді. Бұл нәтижелер қорғауға ұсынылатын 3-қағиданы растайды: төсеніштің εr әсер ету заңдылығы топологияға тәуелсіз.

Осы бөлімдегі салыстырмалы талдау нәтижелері автордың [122] ғылыми жұмысында жарияланған.

# ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста заттар интернеті (IoT) қолданбаларына арналған текстильді төсеніштердегі киетін микрожолақты антенналарды, атап айтқанда, иілуге тұрақты және меншікті жұтылу коэффициенті бойынша белгіленген нормативтік талаптарға сәйкес келетін екі элементті сызықтық антенна торы мен Яги–Уда антеннасын әзірлеуге бағытталған өзекті ғылыми-техникалық міндет шешілді. Жұмыстың мақсатына сәйкес текстильді төсеніштің электрофизикалық қасиеттерінің киетін микрожолақты антенналардың сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары анықталып, солардың негізінде электродинамикалық сипаттамалары жақсартылған антенна әзірленді. Қойылған барлық міндеттер толық қарастырылды.

Жұмыстың негізгі ғылыми және практикалық нәтижелері төмендегідей:

1. IoT-қосымшаларына арналған текстильді төсеніштегі киетін микрожолақты антенналар бойынша қазіргі зерттеулердің жағдайына талдау жүргізілді. Қолданыстағы конструкциялардың, текстильді материалдардың және өткізгіш қабаттарды дайындау технологияларының негізгі артықшылықтары мен шектеулері анықталды. Талдау қолданыстағы шешімдердің бағытталған Яги–Уда топологиясын, жоғары күшейту коэффициентін және толықтай текстильді бір қабатты орындалуды бір мезгілде үйлестірмейтінін көрсетті. Осы негізде зерттеуге алынған екі антенна топологиясын таңдау негізделді.

2. IoT-қолданбаларына арналған текстильді төсеніштегі екі элементті сызықтық антенна торы әзірленіп, оңтайландырылды. Үш текстильді төсеніштің (фетр, джинс матасы, полиэстер) және екі ток өткізгіш материалдың (мыс таспасы, ток өткізгіш мата) үйлесіміне сәйкес келетін алты конфигурация зерттелді. Эксперимент нәтижелері бойынша ең жақсы сәйкестендіру мыс таспасы бар полиэстер негізіндегі конфигурацияда ($S_{11}$ = –28 dB) қол жеткізілді; конструкция антенна жазықтығына нормаль бағытта сәулелену максимумы бар кең сәулелену диаграммасын және 0,86–3,33 dBi күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді. Тордың күшейту коэффициенті мен радиациялық тиімділігі өткізгіш материалына емес, төсеніш материалына тәуелді екені (бір төсеніште $\Delta КК \leq 0{,}18$ dB) анықталды, сондықтан ток өткізгіш мата мыс таспаны сәулелену сипаттамаларын сақтай отырып алмастыра алады. Осы алты конфигурацияны өзара салыстыру негізінде текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттерінің (салыстырмалы диэлектрлік өтімділіктің, диэлектрлік шығындар бұрышы тангенсінің, төсеніш қалыңдығының және ток өткізгіш қабаттың өткізгіштігінің) 2,45 ГГц ISM диапазонында киетін микрожолақты антенналардың электродинамикалық сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары анықталды. Зерттелген үш текстильді төсеніштің ішінде ток өткізгіш матамен үйлесімдегі джинс матасы негізіндегі конфигурация күшейту коэффициенті, импеданстың тұрақтылығы және механикалық икемділіктің неғұрлым теңгерімді үйлесімін қамтамасыз ететіні, ал полиэстер ең жақсы сәйкестендіруді, фетр ең жоғары күшейту коэффициентін қамтамасыз ететіні көрсетілді. Анықталған заңдылықтар киетін антенна төсенішінің материалын негізді түрде таңдауға

мүмкіндік береді және Яги–Уда антеннасын әзірлеудің бастапқы негізі ретінде пайдаланылды.

3. Текстильді төсеніштегі киетін микрожолақты Яги–Уда антеннасы әзірленіп, оңтайландырылды. Антенна бір өткізгіш қабатта орналасқан белсенді элементтен, рефлектордан және екі директордан тұрады, пассивті элементтер белсенді элементпен шеткі өріс арқылы байланысады. Директорлар мен рефлектордың ұзындықтары $k_D \approx 0{,}95$ және $k_R \approx 1{,}10$ қатынастарымен анықталды. Джинс матасы, мақта мата және полиэстер төсеніштерінде модельдеу бойынша антенна жазықтығына нормаль бойынша (broadside) сәулелену, 8,3–8,7 dBi күшейту коэффициенті және 87–89 % радиациялық тиімділік береді. Прототиптердің өлшенген резонанстық жиілігі 2,43–2,48 ГГц болды, нысаналы 2,45 ГГц мәнінен ауытқу 1,22 %-дан аспады.

4. Екі антеннаның иілуге төзімділігі 55–90 мм радиустағы цилиндрлік беттерде зерттелді: антенна торы үшін өлшеу арқылы, Яги–Уда антеннасы үшін модельдеу арқылы. Иілгенде антенна торының резонанстық жиілігі 5,3–10,5 %-ға, Яги–Уда антеннасының жиілігі 3,7–4,5 %-ға төмендеп, екеуінде де ISM диапазонының төменгі шегінен төмен ығысты. Барлық радиуста $S_{11}$ минимумы −10 dB-ден төмен болып қалды. Воксельдік модельде есептелген МЖК антенна торы үшін 1 г тінге 0,0051 Вт/кг және 10 г тінге 0,0156 Вт/кг, Яги–Уда антеннасы үшін 0,0231 және 0,0118 Вт/кг болды. Бұл мәндер FCC (1,6 Вт/кг) және ICNIRP (2,0 Вт/кг) шектерінен кемінде 69 есе төмен және оларға AMC немесе EBG құрылымдарынсыз қол жеткізілді.

5. Екі топология салыстырылды: екеуінің де сәулелену максимумы антенна жазықтығына нормаль бойынша (broadside) бағытталған, бағыттылық коэффициенттері жақын, ал Яги–Уда антеннасының күшейту коэффициенті 5–7 dB жоғары. Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі 1,45-тен 1,9-ға дейін артқанда екі топологияда да бағыттылық пен күшейту коэффициенті төмендеп, негізгі жапырақша кеңейетіні көрсетілді, яғни төсеніштің әсер ету заңдылығы топологияға тәуелсіз. Модельдеу нәтижелері $S_{11}$ өлшеуі арқылы тексерілді, ал сәулелену сипаттамалары тек модельдеу арқылы анықталды.

Жұмыстың мақсаты, яғни 2,45 ГГц жиіліктегі текстиль негіздегі киетін микрожолақты антенналарды әзірлей отырып, төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің антенна параметрлеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау, орындалды. Қойылған бес міндеттің барлығы шешілді.

Нәтижелерді басқа конфигурациядағы киетін текстильді антенналарды жобалауда пайдалануға болады. Жұмыстың нәтижелері Куала-Лумпур университетінің Малайзиялық теңіз инженерлік технологиялар институтының (UniKL MIMET) оқу процесіне енгізілгені енгізу актісімен расталған. Әзірленген антенналарды медициналық бақылау, қауіпсіздік және құтқару жүйелері мен «ақылды қала» инфрақұрылымына арналған киетін IoT-құрылғыларында қолдануға болады.

Кейінгі зерттеулердің бағыттары ретінде әзірленген антенналардың сәулелену диаграммаларына анэхогендік камерада эксперименттік өлшеулер жүргізуді, адам денесіне нақты киетін орналастыру жағдайларында сипаттамаларын кеңейтілген валидациялауды, сондай-ақ сымсыз байланыс

арнасының өткізу қабілеті мен сенімділігін арттыру мақсатында әзірленген конструкцияларды көпантенналы (MIMO) киетін жүйелерге кіріктіруді қарастырған орынды. Анэхогендік камерада сәулелену диаграммаларын эксперименттік анықтау және нақты киетін орналастыру жағдайларында валидация жүргізумен қатар, кейінгі зерттеулердің бағыттарына әзірленген антенна торының топологиясын 1×4 және 2×2 конфигурацияларына дейін масштабтау және МЖК-ның төмен деңгейін сақтай отырып, қол жеткізуге болатын күшейту коэффициентінің өсімін бағалау; жуу циклдерінің, ылғалдылықтың және ұзақ уақыт әсер ететін механикалық жүктеменің текстильді төсеніштер мен өткізгіш қабаттардың электрофизикалық қасиеттерінің тұрақтылығына ықпалын зерттеу; иілу кезіндегі жиіліктік ығысуды алдын ала компенсациялау әдістерін, оның ішінде конструкцияның жазық күйіндегі резонанстық жиілікті мақсатты түрде ығыстыру арқылы әзірлеу; орындалған сандық бағалауға қосымша ретінде меншікті жұтылу коэффициентінің деңгейін физикалық тінге эквивалентті фантомда сәйкестік тұрғысынан тексеру; сондай-ақ әзірленген конструкцияларды бесінші және алтыншы буын желілері үшін өзекті 5 ГГц және sub-6 ГГц диапазондарына бейімдеу мүмкіндігін зерттеу кіреді.

Зерттеу нәтижелері бірнеше бағытта жалғастыруды қажет етеді. Біріншіден, сәулелену диаграммасын, күшейту коэффициентін және радиациялық тиімділікті жаңғырықсыз камерада тәжірибе жүзінде өлшеу модельдеу нәтижелерін толық растауға мүмкіндік береді. Екіншіден, төсеніштің өтімділігін шығын тангенсі мен қалыңдықтан бөлек өзгерту арқылы әр параметрдің әсерін жеке бағалау анықталған заңдылықтарды нақтылайды. Үшіншіден, ылғалдылықтың, жуудың және ұзақ уақыт пайдаланудың антенна сипаттамаларына әсерін зерттеу киетін антенналардың практикалық сенімділігін бағалау үшін маңызды. Төртіншіден, антенна торын көп элементті құрылымға дейін кеңейту және антенналарды нақты киім бұйымдарына біріктіру ұсынылған шешімдерді практикалық IoT-жүйелерге енгізуге жол ашады.

Жалпы алғанда, жұмыста алынған нәтижелер текстильді төсеніштегі киетін микрожолақты антенналарды жобалаудың ғылыми негізін толықтырады және медицина, спорт, қауіпсіздік және ақылды қала салаларындағы IoT-құрылғыларына арналған иілгіш антенналарды әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

# ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ


1 2023–2029 жылдарға арналған цифрлық трансформация, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар саласын және киберқауіпсіздікті дамыту тұжырымдамасын бекіту туралы: Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2023 жылғы 28 наурыздағы № 269 қаулысы [Электрондық ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2300000269

2 Цифрландыру және жасанды интеллект жылын жариялау туралы: Қазақстан Республикасы Президентінің 2026 жылғы 6 қаңтардағы Жарлығы [Электрондық ресурс]. – URL: https://www.akorda.kz/kz/cifrlandyru-zhane-zhasandy-intellekt-zhylyn-zhariyalau-turaly-601458

3 Dian F. J., Vahidnia R., Rahmati A. Wearables and the Internet of Things (IoT), applications, opportunities, and challenges: a survey // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 69200–69211. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2986329.

4 Dai B., Gao C., Xie Y. Flexible wearable devices for intelligent health monitoring // View. – 2022. – Vol. 3. – P. 1–14. doi: 10.1002/viw.20220027.

5 Nashwan A. J., Alhroub A., Younis M. B. Wearable health devices in health care: Narrative systematic review // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19. – Art. 5877. doi: 10.3390/ijerph19105877.

6 Алдашева Л. С., Амирова А. С., Тусупов А. Д., Нуржаубаева Г. С., Әбдіраман Ә. С. Интеллектуальные телекоммуникационные решения для сетей 5G/6G и Smart City в условиях ультраплотной городской среды: монография. – Алматы: Дарын, 2026. – 310 с. – ISBN 978-601-382-387-4.

7 Federal Communications Commission. 47 CFR § 1.1310. Radiofrequency radiation exposure limits. – Washington, DC: FCC.

8 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // Health Physics. – 2020. – Vol. 118, No. 5. – P. 483–524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.

9 James J. R., Hall P. S. Handbook of Microstrip Antenna. – London: Peter Peregrinus, 1989. – 1372 p.

10 Garg R., Bahl I., Bhartia P., Ittipiboon A. Microstrip Antenna Design Handbook. – Norwood: Artech House, 2001. – 841 p.

11 Kadylbekkyzy E., Nurzhaubayeva G., Haris N., Aldasheva L. Wearable Microstrip Antennas for IoT: A Comprehensive Review of Application Areas, Textile Materials, and Body-Centric Design Techniques // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2026. – № 2 (73). – С. 160–171.

12 Mahmood S., Ishak A., Saeidi T., Alsariera H., Alani S., Ismail A., Soh A. Recent advances in wearable antenna technologies: a review // Progress In Electromagnetics Research B. – 2020. – Vol. 89. – P. 1–27. doi: 10.2528/PIERB20071803.

13 Hashim F. F., Mahadi W. N. L., Abdul Latef T., Othman M. B. Key Factors in the Implementation of Wearable Antennas for WBNs and ISM Applications: A Review // Electronics. – 2022. – Vol. 11, No. 15. – Art. 2470. doi: 10.3390/electronics11152470.

14 Abdelghany M. A., Ahmed M. I., Ibrahim A. A., Desai A., Ahmed M. F. Textile Antenna with Dual Bands and SAR Measurements for Wearable Communication // Electronics. – 2024. – Vol. 13, No. 12. – Art. 2251. doi: 10.3390/electronics13122251.

15 Salonen P., Rahmat-Samii Y., Schafhth M., Kivikoski M. Effect of textile materials on wearable antenna performance: A case study of GPS antenna // Proc. of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2004. – P. 459–462.

16 Daya Murali S., Narada B., Muni M., Varma Y. D., Chaitanya S. V. S. K. Development of wearable antennas with different cotton textiles // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2014.

17 Fakirde A., Mulkallal S., Sahare P., Peshwe P. Wearable Flexible Jeans Textile Microstrip Patch Antenna for ISM Band Application // Patch Antenna. – 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3008052/v1.

18 Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2016. – 1104 p.

19 Scarpello M. L., Kazani I., Hertleer C., Rogier H., Van Ginste D. Stability and efficiency of screen-printed wearable and washable antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2012. – Vol. 11. – P. 838–841.

20 Wang Z., Zhang L., Bayram Y., Volakis J. L. Embroidered conductive fibers on polymer composite for conformal antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60. – P. 4141–4147.

21 Scarpello M. L., Vallozzi L., Rogier H., Vande Ginste D. High-gain textile antenna array system for off-body communication // International Journal of Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 2012. – Art. 573438. doi: 10.1155/2012/573438.

22 Workman E., Chang I., Noghanian S. Flexible Textile Antenna Array // Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). – 2015. – P. 569–574.

23 Bemani M., Nikmehr S. A novel wide-band microstrip Yagi-Uda array antenna for WLAN applications // Progress In Electromagnetics Research B. – 2009. – Vol. 16. – P. 389–406.

24 Rodriguez-Ulibarri P., Bertuch T. Microstrip-fed complementary Yagi–Uda antenna // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2016. – Vol. 10, Iss. 9. – P. 926–931. doi: 10.1049/iet-map.2015.0734.

25 Kapetanakis T. N., Nikolopoulos C. D., Petridis K., Vardiambasis I. O. Wearable Textile Antenna With a Graphene Sheet or Conductive Fabric Patch for the 2.45 GHz Band // Electronics. – 2021. – Vol. 10, No. 21. – Art. 2571. doi: 10.3390/electronics10212571.

26 Singh R. K., Michel A., Nepa P., Salvatore A., Terraroli M., Perego P. Compact and Wearable Yagi-like Textile Antennas for Near-Field UHF-RFID Readers // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 69, No. 3. – P. 1324–1333. doi: 10.1109/TAP.2020.3025255.

27 Abdullah N. A. S., Ramli N. H., Yob R. C. A. A RFID tag antenna for wearable application system in microwave frequency band // Journal of Physics:

Conference Series. – 2021. – Vol. 1962, No. 1. – Art. 012034. doi: 10.1088/1742-6596/1962/1/012034.

28 Singh I., Tripathi D. Microstrip patch antenna and its applications: A survey // International Journal of Computer Technology and Applications. – 2011. – Vol. 2. – P. 1595–1599.

29 Tiwari A. R., Tiwari S. D., Khurshid A. A. Design and bending analysis of wearable compact patch antenna for medical telemetry based on flexible material // ECS Transactions. – 2022. – Vol. 107, No. 1. – P. 647–655. doi: 10.1149/10701.0647ecst.

30 Atanasov N. T., Atanasov B. N., Atanasova G. L. Flexible wearable antenna for IoT-based plant health monitoring // Electronics. – 2024. – Vol. 13. – Art. 2956. doi: 10.3390/electronics13152956.

31 Shimu N. J., Ahmed A. Design and performance analysis of rectangular microstrip patch antenna at 2.45 GHz // Proc. of the 5th Int. Conf. on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). – 2016. – P. 1–6. doi: 10.1109/ICIEV.2016.7762943.

32 Alhayajneh A., Baccarini A. N., Weiss G. M., Hayajneh T., Farajidavar A. Biometric authentication and verification for medical cyber physical systems // Electronics. – 2018. – Vol. 7. – Art. 436. doi: 10.3390/electronics7120436.

33 Nurzhaubayeva G., Chezhimbayeva K., Haris N. A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование». – Алматы, 20–21 октября 2022 г.

34 Muneer B., Shaikh F. K., Zhu Q. An RF and microwave aspect of IoT // Antenna for IoT Application. – Hershey: IGI Global, 2020. – Ch. 9. – P. 180–192.

35 Surender D., Khan T., Talukdar F. A., Antar Y. M. Rectenna design and development strategies for wireless applications: A review // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2021. – Vol. 64, No. 5. – P. 16–29.

36 Koçer M., Aydemir M. E. Microstrip patch antenna design for military satellite communication // Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. – 2020. – P. 142–147.

37 Boccia L., Amendola G., Di Massa G. A high performance dual frequency microstrip antenna for Global Positioning System // Proc. of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2001. – Vol. 4. – P. 66–69.

38 Satarkar P. R., Lohani R. B. Characterization of metamaterial-based patch antenna for worldwide interoperability for microwave access application // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2022. – Vol. 11, No. 5. – P. 2687–2695.

39 Rahayu Y., Artiyah I. Design and development of microstrip antenna circular patch array for maritime radar applications // Science, Technology, and Communication Journal. – 2021. – Vol. 1, No. 3. – P. 83–88.

40 Aafizaa K., Uma Haimavathi K., Saravanan S. Recent innovations in microstrip patch antennas: Biomedical uses and wireless integration // Biomedical Materials & Devices. – 2026. – Vol. 4, No. 1. – P. 326–341.

41 Mahfuz M. H., Mahfouz A. M., Baladi E., Kishk A. A. Microstrip patch antennas for breast tumor/cancer cell detection — Challenges, designs and future opportunities: A review // IEEE Access. – 2024.

42 Amagasa S., Kojin H., Kamada M., Fukuoka Y., Inoue S. Evaluation of physical activity using smartphones and wearable devices in healthcare: current situation and future perspectives // Nihon Koshu Eisei Zasshi. – 2021. – Vol. 68, № 9. – P. 585–596. doi: 10.11236/jph.20-143.

43 Lu J., Zhang J., Xie Y. et al. Wearable health devices in health care: narrative systematic review // JMIR mHealth and uHealth. – 2020. – Vol. 8, № 11. – Art. e18907. doi: 10.2196/18907.

44 Yang L., Wei S., Ma J., Hu Xue J., Sun J. Modelling and analysis of propagation characteristics of WBAN in hospital ward scenarios // IET Communications. – 2024. – Vol. 18, № 19. – P. 1510–1523. doi: 10.1049/cmu2.12844.

45 Pinapati S. P., Chen S. J., Ranasinghe D., Fumeaux C. Detuning effects of wearable patch antennas // Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – 2017. – P. 162–165. doi: 10.1109/APMC.2017.8251403.

46 Ali U., Ullah B., Kamal L., Matekovits L., Altaf A. Design, analysis and applications of wearable antennas: a review // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 14458–14486. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3244068.

47 Khan M. U. A. Bending analysis of polymer-based flexible antennas for wearable and IoT applications: a review // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – Art. 357. doi: 10.3390/polym13030357.

48 Kirtania S. G., Elger A. W., Hasan M. R. et al. Flexible antennas: a review // Micromachines. – 2020. – Vol. 11, № 9. – Art. 847. doi: 10.3390/mi11090847.

49 Taha B. S., Marhoon H. M., Naser A. A. Simulating of RF energy harvesting microstrip patch antenna over 2.45 GHz // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7. – P. 5484–5488. doi: 10.14419/ijet.v7i4.27031.

50 Aye E. T., Chaw C. M. N. Rectangular microstrip patch antenna array for RFID application using 2.45 GHz frequency range // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2014. – Vol. 4, № 6. – P. 1–7.

51 Ibrahim N. F., Dzabletey P. A., Kim H., Chung J.-Y. An all-textile dual-band antenna for BLE and LoRa wireless communications // Electronics. – 2021. – Vol. 10, № 23. – Art. 2967. doi: 10.3390/electronics10232967.

52 Nurzhaubayeva G., Chezhimbayeva K., Haris N. Characterization of high impedance of multilayer coplanar waveguide transmission line design for integration with nanodevices // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 4, № 5 (118). – P. 6–14. doi: 10.15587/1729-4061.2022.263671.

53 Nurzhaubayeva G., Chezhimbayeva K. Evaluation of high frequency behavior of the coplanar waveguide transmission line for integration with self-switching nanodevice // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2022. – № 4 (59). – С. 79–89. doi: 10.51775/2790-0886_2022_59_4_79.

54 Jain P., Singh A. K., Pandey J. K. et al. Ultra-thin metamaterial perfect absorbers for single-/dual-/multi-band microwave applications // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2020. – Vol. 14, № 5. – P. 390–396. doi: 10.1049/iet-map.2019.0623.

55 Khan A. M., Youssef A. M., Almohaimeed A. M. Wearable antennas for body-centric wireless communications: a comprehensive review // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 6744–6764. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2887779.

56 Bhatti D. S., Saleem S., Imran A., Iqbal Z., Alzahrani A., Kim H., Kim K.-I. A survey on wireless wearable body area networks: a perspective of technology and economy // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – Art. 7722. doi: 10.3390/s22207722.

57 Natarajan B. Textile-based wearable antennas for body-centric wireless communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, № 5. – P. 3405–3421.

58 Banale A. K., Fante K. A., Kumar S. S., Sampath A. Designs and Materials of Flexible Wearable Microstrip Patch Antennas: A Systematic Review // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7. – Art. 477. doi: 10.1007/s42452-025-06933-2.

59 Gupta B., Sankaralingam S., Dhar S. Development of wearable and implantable antennas in the last decade: A review // Proc. of the Mediterranean Microwave Symposium. – 2010. – P. 251–267.

60 Tavares J., Lacik J., Pinho P., Raida Z., Alves H. Advancing Sustainable RF Energy Harvesting for Wearable Electronics with 2.45 GHz Textile-Printed Rectennas // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 24429. doi: 10.1038/s41598-025-09966-0.

61 Salonen P., Keskilammi M., Rantanen J., Sydänheimo L. A novel Bluetooth antenna on flexible substrate for smart clothing // Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. – 2001. – P. 789–794.

62 Salonen P., Hurme H. A novel fabric WLAN antenna for wearable applications // Proc. of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. – 2003. – P. 100–103.

63 Hertleer C., Rogier H., Vallozzi L., Van Langenhove L. A textile antenna for off-body communication integrated into protective clothing for firefighters // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 2009. – Vol. 57. – P. 919–925.

64 Locher I., Klemm M., Kirstein T., Tröster G. Design and characterization of purely textile patch antennas // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 2006. – Vol. 29. – P. 777–788.

65 Declercq F., Georgiadis A., Rogier H. Wearable aperture-coupled shorted solar patch antenna for remote tracking and monitoring applications // Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation. – 2011. – P. 2992–2996.

66 Brandão D. P. L. Tecnologia da electricidade: Materiais usados em electrotecnia. – Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1983.

67 Zhu S., Langley R. Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 57, No. 4. – P. 926–935. doi: 10.1109/TAP.2009.2014527.

68 Matthews J. C. G., Pettitt G. Development of flexible, wearable antennas // Proc. of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2009. – P. 273–277.

69 Dierck A., Declercq F., Rogier H. Review of active textile antenna co-design and optimization strategies // Proceedings of the IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications. – 2011. – P. 194–201.

70 Howell J. Microstrip antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. – Williamsburg, VA, USA, 1972. – P. 177–180. doi: 10.1109/APS.1972.1146932.

71 Kumar G., Ray K. P. Broadband microstrip antennas. – Boston: Artech House, 2002.

72 Santas J. G., Alomainy A., Hao Y. H. Textile antennas for on-body communications: techniques and properties // IET Seminar Digest. – 2007. doi: 10.1049/ic.2007.1064.

73 Wang Z., Zhang L., Psychoudakis D., Volakis J. L. Flexible textile antennas for body-worn communication // IEEE International Workshop on Antenna Technology. – 2012. – P. 205–208. doi: 10.1109/IWAT.2012.6160788.

74 Kiourti A., Lee C., Volakis J. L. Fabrication of textile antennas and circuits with 0.1 mm precision // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 151–153. doi: 10.1109/LAWP.2015.2435257.

75 Brebels S. et al. SOP integration and codesign of antennas // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 2004. – Vol. 27, № 2. – P. 341–351. doi: 10.1109/TADVP.2004.828822.

76 Hertleer C., Van Laere A., Rogier H., Van Langenhove L. Influence of relative humidity on textile antenna performance // Textile Research Journal. – 2009. – Vol. 80. – P. 177–183.

77 Tronquo A., Rogier H., Hertleer C., Van Langenhove L. Applying textile materials for the design of antennas for wireless body area networks // Proc. of the First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2006.

78 Declercq F., Rogier H., Hertleer C. Permittivity and loss tangent characterization for garment antennas based on a new matrix-pencil two-line method // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2008. – Vol. 56. – P. 2548–2554.

79 Kaija T., Lilja J., Salonen P. Exposing textile antennas for harsh environment // Proc. of the Military Communications Conference. – 2010. – P. 737–742.

80 Ouyang Y., Chappell W. J. High-frequency properties of electrotextiles for wearable antenna applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2008. – Vol. 56. – P. 381–389.

81 Kadylbekkyzy E., Nurzhaubayeva G., Haris N., Aldasheva L., Yedilkhan D., Adam I. Performance Evaluation of Wearable Antenna Arrays for IoT Applications in Smart City // International Journal of Antennas and Propagation. – 2026. – Vol. 2026. – Art. 3361033. doi: 10.1155/ijap/3361033.

82 Nurzhaubayeva G., Haris N., Chezhimbayeva K. Design of the Wearable Microstrip Yagi-Uda Antenna for IoT Applications // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 24–33. doi: 10.15866/irecap.v14i1.24315.

83 A Compact Wearable Patch Antenna on Leather Substrate for Smart IoT Applications: Design, Performance, Bending, SAR, and Link Budget Analysis // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2025. doi: 10.1007/s13369-025-10483-5.

84 Ferreira D., Pires P., Rodrigues R., Caldeirinha R. F. S. Wearable Textile Antennas: Examining the Effect of Bending on Their Performance // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2017. – Vol. 59, No. 3. – P. 54–59. doi: 10.1109/MAP.2017.2686093.

85 Khan M., Alam A. K. M., Talha M. A., Kumar P. Investigation of a compact ultrawide band antenna for wearable applications // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2014. – Vol. 4. – Art. 124. doi: 10.15866/irecap.v4i4.2702.

86 Dey S., Saha N. Narrow band and UWB wearable antennas: design and assessment of the conformal characteristics in terms of impedance matching and radiation properties // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2013. – Vol. 3. – P. 42–50. doi: 10.15866/irecap.v3i1.4186.

87 Sultana A., Khan M. Design of UWB band notch textile antenna for body-centric wireless network with the comparison of five different textile substrates // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2020. – Vol. 10, № 5. – P. 302–310. doi: 10.15866/irecap.v10i5.18107.

88 Smida A., Iqbal A., Alazemi A. J., Waly M. I., Ghayoula R., Kim S. Wideband wearable antenna for biomedical telemetry applications // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 15687–15694. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967413.

89 Ismail S., Barton A., Gaydecki P., Karimian N., Karimian D. Design and development of a compact wearable dipole GPS antenna // 46th European Microwave Conference (EuMC). – London, UK, 2016. – P. 96–99. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824286.

90 Varma D. R., Murali M., Krishna M. V. Design of wearable microstrip patch antenna for biomedical application with a metamaterial // Evolution in Signal Processing and Telecommunication Networks. – Singapore: Springer, 2022. – P. 839. doi: 10.1007/978-981-16-8554-5_40.

91 Saleh G. Dual resonant wearable metamaterial for medical applications // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2021. – Vol. 11, № 2. – P. 85–93. doi: 10.15866/irecap.v11i2.19856.

92 Rahman M., Hossain T., Khan M. Novel design of penta band planar inverted F antenna for wireless communication // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2021. – Vol. 11, № 2. – P. 77–84. doi: 10.15866/irecap.v11i2.19784.

93 Zidan M., Ibrahim O., Yaseen L., Abdullah H., Taha M., Rashid S., Islam N. A new approach for the design of frequency reconfigurable antenna for cognitive radio applications // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2023. – Vol. 18, № 4. – P. 310–319. doi: 10.15866/iree.v18i4.22280.

94 Abohmra A., Abbas H., Alomainy A., Imran M. A., Abbasi Q. H. Flexible terahertz antenna arrays based on graphene for body-centric wireless communication // 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – Florence, Italy, 2023. – P. 1–5. doi: 10.23919/EuCA57121.2023.10133572.

95 Band-stop filter // Federal Standard 1037C. – 2018.

96 Hazarika B., Basu B., Nandi A. An AMC-backed monopole antenna to obtain high gain, conformability and lower SAR for WBAN applications // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2020. – Vol. 30, № 12. – Art. e22441. doi: 10.1002/mmce.22441.

97 Singh S., Verma S. Printed compact asymmetric dual L-strip fed split-ring shaped EBG-based textile antenna for WBAN applications // Microwave and Optical

Technology Letters. – 2020. – Vol. 62, № 12. – P. 3897–3904. doi: 10.1002/mop.32512.

98 Abdalla M. A., Wahba W. W., Allam A. A. Analysis and design of a compact CRLH-inspired defected-ground resonator for triple-band antenna applications // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2020. – Vol. 23, № 1. – P. 114–122. doi: 10.1016/j.jestch.2019.04.009.

99 Prudhvi Nadh B. Windmill-shaped antenna with artificial magnetic conductor-backed structure for wearable medical applications // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2020. – Vol. 33. – Art. e2757. doi: 10.1002/jnm.2757.

100 Zheng H., Cui W., Liu R. et al. Design of flexible dual-band antenna and metamaterial structure for wearable body area network // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2022. – Vol. 32, № 5. – Art. e23083. doi: 10.1002/mmce.23083.

101 Soni G. K., Yadav D., Kumar A., Jain P., Yadav M. V. Design and optimization of flexible DGS-based microstrip antenna for wearable devices in the sub-6 GHz range using the Nelder–Mead simplex algorithm // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 24. – Art. 103470. doi: 10.1016/j.rineng.2024.103470.

102 Soni G. K., Yadav D., Kumar A., Jain P., Rathi A. Design and SAR analysis of DGS-based deformed microstrip antenna for on/off-body smart wearable IoT applications // Physica Scripta. – 2025. – Vol. 100, № 1. – Art. 015536. doi: 10.1088/1402-4896/ad9d89.

103 Sugumaran B., Balasubramanian R., Palaniswamy S. K. Reduced specific absorption rate compact flexible monopole antenna system for smart wearable wireless communications // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2021. – Vol. 24, № 3. – P. 682–693. doi: 10.1016/j.jestch.2020.12.012.

104 Yalduz H., Tabaru T. E., Kilic V. T., Turkmen M. Design and analysis of low-profile and low-SAR full-textile UWB wearable antenna with metamaterial for WBAN applications // AEÜ – International Journal of Electronics and Communications. – 2020. – Vol. 126. – Art. 153465. doi: 10.1016/j.aeue.2020.153465.

105 Ali S. M., Sovuthy S., Noghanian S. et al. Design and evaluation of a flexible dual-band meander line monopole antenna for on- and off-body healthcare applications // Micromachines. – 2021. – Vol. 12, № 5. – Art. 475. doi: 10.3390/mi12050475.

106 Mohandoss S., Palaniswamy S. K., Thipparaju R. R. et al. On the bending and time-domain analysis of compact wideband flexible monopole antennas // AEÜ – International Journal of Electronics and Communications. – 2019. – Vol. 101. – P. 168–181. doi: 10.1016/j.aeue.2019.01.015.

107 Prudhvi Nadh B., Madhav B. T. P., Siva Kumar M., Venkateswara Rao M., Anilkumar T. Circular ring structured ultra-wideband antenna for wearable applications // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2019. – Vol. 29, № 4. – Art. e21580. doi: 10.1002/mmce.21580.

108 Nguyen T. M., Chung J.-Y. RF conductivity measurement of conductive Zell fabric // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. – 2016. – Vol. 16, № 1. – P. 24–28. doi: 10.5515/JKIEES.2016.16.1.24.

109 Adam I., Kamarudin M. R., Rambe A. H., Haris N., Rahim H. A., Wan Muhamad W. Z. A., Ismail A. M., Jusoh M., Yasin M. N. M. Investigation on Wearable Antenna under Different Bending Conditions for Wireless Body Area Network (WBAN) Applications // International Journal of Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 5563528. doi: 10.1155/2021/5563528.

110 Hemjith M., Anoop B. K., Manoj K. C. A Review on Recent Trends and Developments in the Design and Application of Yagi Uda Antenna // IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering. – 2015. – Vol. 10, Iss. 5, Ver. II. – P. 28–34. doi: 10.9790/2834-10522834.

111 Constantinescu C., Pacurar C., Giurgiuman A., Munteanu C., Andreica S., Gliga M. High Gain Improved Planar Yagi Uda Antenna for 2.4 GHz Applications and Its Influence on Human Tissues // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 11. – Art. 6678. doi: 10.3390/app13116678.

112 Dass R, Thirumoorthy G, Ananthakrishnan G, et al. Optimum design of planar quasi-Yagi antenna for wearable Internet of Things (IoT) applications. Microw Opt Technol Lett. 2024; 66:e33839. doi:10.1002/mop.33839

113 Ahmed S., Le D., Sydänheimo L., Ukkonen L., Björninen T. Wearable Metasurface-Enabled Quasi-Yagi Antenna for UHF RFID Reader with End-Fire Radiation along the Forearm // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 77229–77238. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078239.

114 Chopra R., Kumar G. Uniplanar microstrip antenna for end-fire radiation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, № 5. – P. 3422–3426. doi: 10.1109/TAP.2019.2900334.

115 Tanti R. K., Warathe S., Anveshkumar N. Planar Yagi–Uda antenna with mirrored ground plane for WLAN // 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – 2020. – P. 1–5. doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225278.

116 Jianying L. et al. Bending effects on a flexible Yagi–Uda antenna for wireless body area network // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Shenzhen, 2016. – P. 1001–1003. doi: 10.1109/APEMC.2016.7522928.

117 Нуржаубаева Г. С., Қадылбекқызы Э., Харис Н. Аналитический обзор многослойной микрополосковой антенны Яги-Уда для приложений Интернета вещей (IoT) // Научные труды Военного института информационных, радиоэлектронных и связи. – 2022. – № 2 (48). – С. 46–54.

118 CST Studio Suite 2024 [Электрондық ресурс]. – Dassault Systèmes SIMULIA, 2024. – URL: https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite

119 Khan M. U. A., Raad R., Tubbal F., Theoharis P. I., Liu S., Foroughi J. Bending Analysis of Polymer-Based Flexible Antennas for Wearable, General IoT Applications: A Review // Polymers. – 2021. – Vol. 13, No. 3. – Art. 357. doi: 10.3390/polym13030357.

120 Савельев И. В. Курс общей физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2022. – 344 с.

121 Nurzhaubayeva G., Chezhimbayeva K., Haris N. The development and analysis of a wearable textile Yagi-Uda antenna design for security and rescue purposes

// News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-mathematical series. – 2024. – Vol. 3, No. 351. – P. 138–151. doi: 10.32014/2024.2518-1726.297.

122 Nurzhaubayeva G., Haris N., Kurakbayev A., Amirova A., Aldasheva L., Azim M. Comparative study of textile based wearable antenna designs for IoT applications // 2026 IEEE 6th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – Astana, 2026. – P. 1–5. doi: 10.1109/SIST61674.2026.11596409.

123 Haroon, Ullah S., Flint J. A. Electro-textile based wearable patch antenna on biodegradable poly lactic acid (PLA) plastic substrate for 2.45 GHz, ISM band applications // International Conference on Emerging Technologies (ICET). – IEEE, 2014. – P. 158–163. doi: 10.1109/ICET.2014.7021036.

# А ҚОСЫМШАСЫ
## Ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерін енгізу актісі



UNIVERSITI KUALA LUMPUR
Malaysian Institute of Marine Engineering Technology (UniKL MIMET)
Dataran Industri Teknologi Kejuruteraan Marin,
Bandar Teknologi Maritim,
Jalan Pantai Remis,
32200 Lumut, Perak.
Tel: (605) 690 9000
Fax: (605) 690 9091
Website : www.mimet.edu.my

REF: UniKL MIMET/Dean/Corps/2025 (63)

Date: 9 September 2025

To Whom It May Concern,

**CERTIFICATE OF IMPLEMENTATION OF RESEARCH FINDINGS**

This document serves to certify that the key scientific contributions and technical solutions for improving the gain of wearable multilayer microstrip antennas, as presented in the dissertation of **Gulsaya Nurzhaubayeva** of the **Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev**, for the degree of **Doctor of Philosophy (PhD)** in the specialty **8D06201 – Radio Engineering, Electronics, and Telecommunications,** have been successfully introduced into the educational curriculum of the Universiti Kuala Lumpur Malaysian Institute of Marine Engineering Technology (UniKL MIMET).

Research validation conducted at the UniKL MIMET laboratory confirms that a systematic approach—encompassing design, simulation, fabrication, and measurement—is essential for assessing the performance of these textile-based antennas. The aforementioned work provides a robust methodology for evaluating critical parameters, including impedance matching ($S_{11}$), gain, directivity, radiation patterns, and bending robustness in both multilayer and array configurations. These outcomes offer substantial guidance on material selection and integration strategies for developing reliable smart-textile antenna systems.

The results of this research are now actively utilized in lecture courses and laboratory training sessions for our students, enhancing the practical and theoretical quality of our curriculum.

Sincerely,

**Ts. Dr Zaini Zainal Muhktar**
Dean / Head of Campus
Universiti Kuala Lumpur - Malaysian Institute of Marine Engineering Technology (UniKL MIMET)

*Where Knowledge is Applied*
Managed by Universiti Teknikal MARA Sdn. Bhd. (570132-T)

Group of Companies