دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

کاهش نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) در سامانه‌های MIMO-OFDM با استفاده از پردازش فضایی و زمانی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم

بشیررضا کریمی

اساتید راهنما

دکتر محمد جواد امیدی

دکتر مجتبی بهشتی

۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

کاهش نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) در سامانه‌های MIMO-OFDM با استفاده از پردازش فضایی و زمانی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم

بشیررضا کریمی

اساتید راهنما

دکتر محمد جواد امیدی

دکتر مجتبی بهشتی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق – مخابرات سیستم آقای بشیررضا کریمی

تحت عنوان

کاهش نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) در سامانه‌های MIMO-OFDM با استفاده از پردازش فضایی و زمانی

در تاریخ ۹۲/۱۰/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمد جواد امیدی
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مجتبی بهشتی
۳- استاد داور	دکتر علیمحمد دوست‌حسینی
۴- استاد داور	دکتر احسان یزدیان
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدعلی خسروی‌فرد

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش خدای را که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

در ابتدا از اساتید فرهیخته و فرزانه، جناب آقای دکتر محمد جواد امیدی و جناب آقای دکتر مجتبی بهشتی، که زحمت راهنمایی پایان نامه را بر عهده گرفتند و در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند، صمیمانه تشکر می نمایم. این تحقیق بدون رهنمونهای ارزشمند شما بزرگواران به سرانجام نمی رسید.

از داوران محترم، جناب آقای دکتر علیمحمد دوست حسینی و جناب آقای دکتر احسان یزدیان، برای فرصتهایی که در مطالعه و ارزیابی تحقیق صرف نمودند سپاسگذارم. کارشناسی دقیق، حسن خلق و سعه صدر شما بزرگواران در جلسه دفاع همواره در یاد می ماند.

همچنین از خانواده عزیزم که همواره دعای خیر و حضور گرمشان، مشکلات راه را برایم آسان نمود، صمیمانه تشکر می کنم. خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

خزانه داران علم و امانتداران حکمت،

مفسران وحی و بنیان های توحید،

پیشوایان راهنما و حامیان دین خدا،

دارندگان خرد و پناهگاه مردمان،

اهل بیت عصمت و طهارت (ع)

(برگرفته از زیارت جامعه کبیره)

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

نمادها ..... ده

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ هدف پژوهش ۳

۱-۲ ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: سامانه‌های مبتنی بر OFDM

۲-۱ تاریخچه ۹

۲-۲ سامانه SISO-OFDM ۹

۲-۳ محدودیتهای پیاده‌سازی ۱۳

۲-۴ نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) ۱۵

۲-۴-۱ تشعشع خارج باند ۱۵

۲-۴-۲ تعریف و فرمول‌بندی PAPR ۲۲

۲-۵ سامانه MIMO-OFDM ۲۶

فصل سوم: روشهای کاهش PAPR در سامانه‌های OFDM

۳-۱ کاهش PAPR در سامانه SISO ۳۱

۳-۱-۱ روشهای با اعوجاج ۳۴

۳-۱-۲ روشهای احتمالاتی و چند سیگنالینگی ۳۶

۳-۱-۳ روشهای کدگذاری ۴۴

۳-۲ کاهش PAPR در سامانه MIMO ۴۶

۳-۲-۱ روشهای تعمیم یافته ۴۶

۳-۲-۲ روشهای اختصاصی ۵۱

۳-۳ معیارهای انتخاب روش کاهش PAPR ۵۲

۳-۳-۱ توانایی کاهش PAPR ۵۲

۳-۳-۲ توان سیگنال ارسالی ۵۳

۳-۳-۳ نرخ خطای بیت ۵۳

۳-۳-۴ افت نرخ ارسال داده ۵۳

۳-۳-۵ پیچیدگی محاسباتی ۵۳

۳-۴ جمع‌بندی ۵۴

فصل چهارم: روشهای پیشنهادی کاهش PAPR در سامانه MIMO-OFDM

۴-۱ مدل سامانه ۵۵

۴-۲ روشهای پیشنهادی ۵۶

۴-۲-۱ روش ۱: شیفت فضایی و زمانی ۵۹
۴-۲-۲ روش ۲: درهم‌نهی فضایی و زمانی ۶۱
۴-۲-۳ روش ۳: شیفت فضایی و درهم‌نهی زمانی ۶۴
۴-۳ ارسال اطلاعات جانبی ۶۷
۴-۴ مقایسه پیچیدگی ۷۴
۴-۵ نتیجه‌گیری ۷۹
فصل پنجم: نتایج شبیه‌سازی
۵-۱ پارامترهای شبیه‌سازی ۸۰
۵-۲ نتایج شبیه‌سازی ۸۱
۵-۳ نتیجه‌گیری ۸۹
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۶-۱ نتیجه‌گیری ۹۰
۶-۲ پیشنهادها ۹۲
مراجع ۹۳

نمادها

نمادهای ریاضی

x	اسکالر
$\mathbf{x}$	بردار ستونی حوزه زمان
$\mathbf{X}$	بردار ستونی حوزه فرکانس
x_i	درایه i ام بردار $\mathbf{x}$
$\mathbf{x}^T$	ترانهاده بردار $\mathbf{x}$
$\tilde{\mathbf{x}}$	نسخه کاهش PAPR یافته بردار $\mathbf{x}$
$\lvert x \rvert$	قدر مطلق x
$\lVert \mathbf{x} \rVert$	نرم یا طول بردار $\mathbf{x}$
$\lVert \mathbf{x} \rVert_\infty$	نرم بینهایت بردار $\mathbf{x}$
$\lfloor x \rfloor$	بزرگترین عدد صحیح کوچکتر یا مساوی x
$\lceil x \rceil$	کوچکترین عدد صحیح بزرگتر یا مساوی x
$\arg\{x\}$	فاز x
$\hat{x}$	تخمین x
σ_x^2	واریانس x
$\mathrm{mod}(x, y)$	باقیمانده تقسیم x بر y
$\Pr(\cdot)$	عملگر احتمال
$\mathcal{E}\{\cdot\}$	عملگر امید ریاضی
$\log_b(\cdot)$	لگاریتم در پایه b
$s(t)$	سیگنال پیوسته زمان باند پایه
$\bar{S}_s$	توان متوسط سیگنال $s(t)$
N_t	تعداد آنتنهای ارسال
N_r	تعداد آنتنهای دریافت
T_B	دوره زمانی بلوک OFDM
N	تعداد زیرحاملها در بلوک OFDM
N_i	تعداد زیرحاملهای حاوی اطلاعات داده
N_{si}	تعداد زیرحاملهای حاوی اطلاعات جانبی
Δf	فاصله بین دو زیرحامل همسایه
L	عامل بیش نمونه‌برداری
M	تعداد زیربلوکها در هر آنتن ارسال

نشانهای کوتاه

3GPP	3rd generation partnership project
ADC	Analog-to-digital converter
ADSL	Asymetric digital subscriber line
AM	Amplitude modulation
PM	Phase modulation
A-PTS	Alternate partial transmit sequence
BER	Bit error rate
CCDF	Complementary cumulative distribution function
CCRR	Computational complexity reduction ratio
CDF	Cumulative distribution function
CDMA	Code division multiple access
CFO	Carrier frequency offset
Co-PTS	Cooperative partial transmit sequence
CP	Cyclic prefix
CR	Cognitive radio
DAB	Digital audio broadcasting
DAC	Digital-to- analog converter
DFT	Discrete Fourier transform
DMT	Discrete multi-tone
d-PTS	Directed partial transmit sequences
d-SLM	Directed selected mapping
DVB	Digital video broadcasting
ETSI	European telecommunications standard institute
HDSL	High-bit-rate digital subscriber line
HPA	High power amplifier
ICI	Inter-carrier interference
IFFT	Inverse fast Fourier transform
I-STI	Improved spatial and temporal interleaving
ISI	Inter-symbol interference
I-STS	Improved spatial and temporal shifting
LAST	Linear asymmetrical transform
LST	Linear symmetrical transform
LTE	Long term evolution
MAP	Maximum-a-posteriori
MC-CDMA	Multicarrier CDMA
MCM	Multicarrier modulation
MIMO	Multiple-input multiple-output
ML	Maximum likelihood
NALST	Nonlinear asymmetrical transform
NLST	Nonlinear symmetrical transform
OBO	Output back-off
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
O-PTS	Ordinary partial transmit sequences
O-SLM	Ordinary selected mapping
P/S	Parallel-to-serial converter
PAPR	Peak-to-average power ratio
PBO	Peak back-off
pdf	Probability density function
PTS	Partial transmit sequences
QAM	Quadrature amplitude modulation
QPSK	Quadrature phase shift keying

RF	Radio frequency
SISO	Single-input single-output
S/P	Serial-to-parallel converter
STI	Spatial and temporal interleaving
STS	Spatial and temporal shifting
S-PTS	Simplified partial transmit sequences
S-SLM	Simplified selected mapping
SIER	Side information error rate
SLM	Selected sorting
SNR	Signal-to-noise ratio
UWB	Ultra wideband
VDSL	Very high-speed digital subscriber line
WiMax	Worldwide interoperability for microwave access
WLAN	Wireless local area network
WMAN	Wireless metropolitan area network
ZP	Zero-padded

چکیده

سامانه‌های مخابراتی دیجیتال نوین امکان استفاده همزمان از فناوریهای OFDM و MIMO را در سامانه‌های MIMO-OFDM فراهم نموده است. کارامدی OFDM در همسانسازی ساده کانالهای فرکانس- انتخابی و افزایش ظرفیت کانال بدون تغییر در پهنای باند و توان ارسالی با بهره‌گیری از فناوری MIMO، توجه بسیاری از استانداردها و سامانه‌های مخابرات بیسیم را به خود جلب کرده است. یکی از عیبهای سامانه‌های MIMO-OFDM نسبت بالای توان اوج به توان متوسط (PAPR) سیگنال ارسالی است. عبور چنین سیگنالی از عناصر غیر خطی فرستنده مانند تقویت کننده توان (HPA) اعوجاج سیگنال ارسالی را به همراه دارد. این موضوع موجب اعوجاج مؤلفه‌های فرکانسی داخل باند و تشعشع خارج باند می‌گردد. PAPR بالا افزایش پیچیدگی مبدل دیجیتال به آنالوگ را نیز به همراه دارد. با افزایش تعداد آنتنهای ارسال در فرستنده، احتمال وقوع PAPR بالا افزایش می‌یابد. روشهای گوناگونی برای کاهش PAPR در سامانه‌های SISO ارائه شده است. کاهش PAPR در سامانه‌های MIMO نیز در دهه اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب نموده است. در این پایان‌نامه روشهای کاهش PAPR بویژه در حالت MIMO معرفی، بررسی و دسته‌بندی شده است. همچنین سه روش جدید مبتنی بر پردازش فضایی و زمانی برای کاهش PAPR سامانه MIMO-OFDM پیشنهاد شده است. در این روشها ابتدا بلوک OFDM در هر آنتن ارسال به زیربلوکهای مجزا افراز شده و هر یک از زیربلوکها با استفاده از IFFT به حوزه زمان منتقل می‌گردد. سپس پردازش فضایی و زمانی روی زیربلوکهای همه آنتنها اعمال می‌گردد تا دنباله‌های نامزد مختلف در هر آنتن تولید شود. سرانجام، دنباله نامزدی که دارای کمترین PAPR باشد، به عنوان سیگنال اصلاح شده هر آنتن در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد روشهای پیشنهادی در کاهش PAPR سیگنال ارسالی نسبت به روشهای موجود بهبود یافته است. همچنین پیچیدگی محاسباتی روشهای پیشنهادی نسبت به پیچیدگی محاسباتی روشهای موجود کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: مدولاسیون چند حاملی، سامانه چند ورودی- چند خروجی، نسبت توان اوج به توان متوسط، پردازش فضایی و زمانی

فصل اول
مقدمه

افزایش تقاضا برای استفاده از سامانه‌های مخابرات بیسیم با نرخ داده بالا، اینترنت بیسیم پهن باند، امنیت ارسال بهتر و امکان تحرک بالا، فناوری بیسیم را به سمت خدمات چند رسانه‌ای پرسرعت سوق داده است. پژوهشهای جدید نشان می‌دهد که در سالهای پیش رو، ترافیک انتقال داده بیسیم به صورت قابل توجه افزایش خواهد یافت. درصد بالایی از این ترافیک به گوشیهای هوشمند و انتقال فیلم اختصاص خواهد داشت. در این راستا، صنعت مخابرات بر نسل جدید سامانه‌های مخابراتی تمرکز کرده است. از ویژگیهای این نسل می‌توان به ارتباط امن و همه جانبه اشاره کرد که در آن انتقال صوت، تصویر، فیلم و داده در هر زمان و مکان با نرخی بالاتر فراهم می‌شود. نسل جدید سامانه‌ها از فناوریهای نوین مخابرات مانند مدولاسیون چند حاملی (MCM)[۱] به شکل OFDM[۲] [۱] و فناوری چند ورودی- چند خروجی (MIMO)[۳] [۲] بهره می‌برد.

OFDM در کنار مزایای بسیار، با محدودیتهایی نیز روبرو است. از این محدودیتها می‌توان به آفست فرکانسی حامل، آفست زمان نمونه‌برداری، گسترش داپلر، نویز فاز، ناکافی بودن پیشوند چرخشی (CP)[۴] و نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR)[۵] بالا اشاره کرد. این پایان‌نامه به مطالعه و بررسی معایب PAPR بالا در

---

[۱] Multicarrier modulation

[۲] Orthogonal frequency division multiplexing

[۳] Multiple-input multiple-output

[۴] Cyclic prefix

[۵] Peak-to-average power ratio

سامانه‌های مبتنی بر OFDM و روشهای کاهش PAPR در آنها می‌پردازد. تمرکز این پژوهش بر روشهای کاهش PAPR در سامانه‌های MIMO-OFDM خواهد بود. در بخش اول این فصل، هدف پایان‌نامه شرح داده می‌شود و در بخش دوم، ساختار پایان‌نامه مرور می‌گردد.

۱-۱ هدف پژوهش

OFDM به عنوان یک فناوری کارامد برای مخابرات دیجیتال شناخته شده است [۳]. OFDM به صورت تجاری در شبکه‌های محلی بیسیم HIPERLAN/2 و IEEE 802.11 ، شبکه‌های منطقه‌ای بیسیم IEEE 802.22 ، پخش صوت دیجیتال (DAB)[۱] و پخش ویدیوی دیجیتال (DVB)[۲] به کار می‌رود و مدولاسیون برگزیده برای شبکه‌های شهری بیسیم IEEE 802.16 است. همچنین OFDM برای استاندارد سیار بیسیم باند وسیع IEEE 802.20 ، UWB[۳] و LTE[۴] مورد توجه قرار گرفته است [۴] و [۵]. در OFDM از تبدیل فوریه سریع (FFT)[۵] برای ارسال موازی داده‌ها روی تعداد زیادی حامل استفاده می‌گردد. OFDM روشی کارامد برای مخابرات بیسیم است زیرا الف) با محوشدگی چند مسیری[۶] و تداخل بین حاملی[۷] به صورت مؤثر مقابله می‌کند; ب) پیچیدگی پیاده‌سازی کمتری نسبت به مدولاسیون تک حاملی دارد و ج) بازده طیفی بالایی را برای مخابرات بیسیم پهن باند فراهم می‌کند. این مزایا با تقسیم یک کانال فرکانس- انتخابی به زیرکانالهای موازی باریک با محوشدگی تخت به دست می‌آید.

در بسیاری از کاربردهای مخابرات بیسیم به نرخ داده بالا نیاز است که پهنای باند بزرگتری را می‌طلبد. از سوی دیگر، به دلیل وجود محدودیت در پهنای باند، معمولاً افزایش پهنای باند از نظر اقتصادی مناسب نیست. در این حالت استفاده از چند آنتن ارسال و دریافت یا فناوری MIMO راه حلی عملی به نظر می‌رسد. فناوری MIMO می‌تواند برای دستیابی به بهره چندگانگی[۸]، افزایش ظرفیت سامانه و کاهش نرخ خطای بیت (BER)[۹] به کار رود. پیشرفتهای جدید در این فناوری موجب بهبود چشمگیر کارایی سامانه‌های OFDM شده است.

---

[۱] Digital audio broadcasting

[۲] Digital video broadcasting

[۳] Ultra wideband

[۴] Long term evolution

[۵] Fast Fourier transform

[۶] Multipath fading

[۷] Inter-carrier interference

[۸] Diversity

[۹] Bit error rate

سیگنال OFDM بر خلاف سیگنال تک حاملی از تعداد زیادی مؤلفه تشکیل شده است. در این حال امکان تولید دامنه‌های بسیار بزرگ بدلیل هم‌فازی مؤلفه‌ها وجود دارد. بنابراین توان متوسط سیگنال بسیار کوچکتر از توان اوج خواهد بود. به این پدیده نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) بالا گفته می‌شود. این عیب سیگنال OFDM موجب برش یا اعوجاج سیگنال توسط عناصر غیرخطی مانند تقویت کننده توان می‌گردد و پیاده‌سازی سامانه‌ها را پیچیده می‌کند [۶]. برای دوری از برش یا اعوجاج سیگنال ارسالی، تقویت کننده توان باید ناحیه خطی وسیعی داشته باشد. افزایش ناحیه خطی موجب کاهش بازده توان تقویت کننده می‌شود.

اگر تقویت کننده غیرخطی در ناحیه خطی کوچکی کار کند، برش دامنه‌های بزرگ سیگنال را به همراه دارد. برش دامنه‌ها موجب اعوجاج داخل باند[۱] و گستردگی پهنای باند فرکانسی سیگنال می‌گردد. گستردگی پهنای باند فرکانسی معمولاً به صورت تشعشع خارج باند[۲] مطرح می‌شود. تشعشع خارج باند برای سامانه‌های موجود در باندهای فرکانسی مجاور، مزاحمت ایجاد می‌کند و باید از آن دوری شود. بنابراین کاهش دامنه‌های بزرگ سیگنال ارسالی با استفاده از روشهای مناسب ضروری است. روشهای گوناگونی برای کاهش PAPR سامانه‌های OFDM تک ورودی- تک خروجی (SISO)[۳] ارائه شده است. تغییر شکل همراه با اعوجاج سیگنال، تولید دنباله‌های نامزد مختلف حاوی اطلاعات یکسان و کدگذاری، روشهایی هستند که برای کاهش PAPR سیگنال استفاده می‌شوند.

استفاده از چند آنتن ارسال در سامانه MIMO می‌تواند مسأله PAPR را وخیم‌تر کند. در سالهای اخیر روشهایی برای کاهش PAPR در سامانه‌های MIMO پیشنهاد شده است که معمولاً تعمیم همان روشهای SISO برای هر آنتن ارسال است. از آنجا که این روشها برای حالت SISO طراحی شده‌اند، به کارگیری آنها در سامانه‌های MIMO پیچیدگی سامانه را افزایش می‌دهد.

هدف این پژوهش، معرفی، مطالعه و بررسی روشهای کاهش PAPR برای سامانه‌های MIMO-OFDM است. در این پژوهش ویژگیها، مزایا و معایب روشهای کاهش PAPR بررسی می‌گردد. همچنین روشهایی برای کاهش PAPR در سامانه‌های MIMO-OFDM پیشنهاد می‌شود و کارایی روشها به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری بررسی می‌گردد.

---

[۱] In-band distortion

[۲] Out-of-band radiation

[۳] Single-input single-output

۱-۲ ساختار پایان‌نامه

شکل ۱-۱ ساختار کلی پایان‌نامه شامل پیش نیازها و نوآوریها را نشان می‌دهد. جزئیات مراحل مختلف به شرح زیر است:

در **فصل دوم**، تاریخچه و روند پیشرفت OFDM بیان می‌شود. سپس با مرور اصول مدولاسیون OFDM ، ساختار کلی یک سامانه SISO-OFDM معرفی می‌گردد و برخی از محدودیتهای سامانه‌های مبتنی بر OFDM هنگام استفاده در سناریوهای نوین بیسیم بیان می‌شود. یکی از محدودیتها نسبت توان اوج به توان متوسط بالای سیگنال ارسالی است. این پدیده باعث اعوجاج یا برش سیگنال توسط تقویت کننده توان می‌گردد که اعوجاج داخل باند و تشعشع خارج باند را به همراه دارد. در این فصل مدلهای مختلف تقویت کننده توان و منحنی مشخصه آنها معرفی می‌شود. همچنین PAPR سیگنال OFDM که معیاری برای سنجش میزان تولید تشعشع خارج باند است، بررسی می‌گردد. منحنی تابع توزیع تجمعی مکمل (CCDF)[۱] برای بررسی عملکرد روشهای کاهش PAPR نیز معرفی می‌شود. در پایان، با معرفی روشهای چندآنتنی و مزایای آنها، مسأله PAPR و منحنی تابع توزیع تجمعی مکمل در سامانه‌های MIMO-OFDM بررسی می‌شود.

در **فصل سوم**، ابتدا روشهای مرسوم کاهش PAPR برای سامانه‌های SISO-OFDM فهرست می‌شود. این روشها در سه گروه روشهای با اعوجاج، روشهای احتمالاتی و چند سیگنالینگی و روشهای کدگذاری بررسی می‌شوند. سپس معیارهای انتخاب روش مناسب مانند میزان توانایی کاهش PAPR و پیچیدگی محاسباتی بیان می‌شود. سرانجام، روشهای کاهش PAPR در سامانه‌های MIMO-OFDM مرور می‌گردد. این روشها در دو گروه روشهای تعمیم یافته و روشهای اختصاصی دسته‌بندی می‌شوند. در گروه اول، روشهای حالت SISO به طور مستقیم در هر آنتن ارسال استفاده می‌شود. در گروه دوم، روشهایی به طور خاص برای سامانه‌های MIMO-OFDM مطرح شده است.

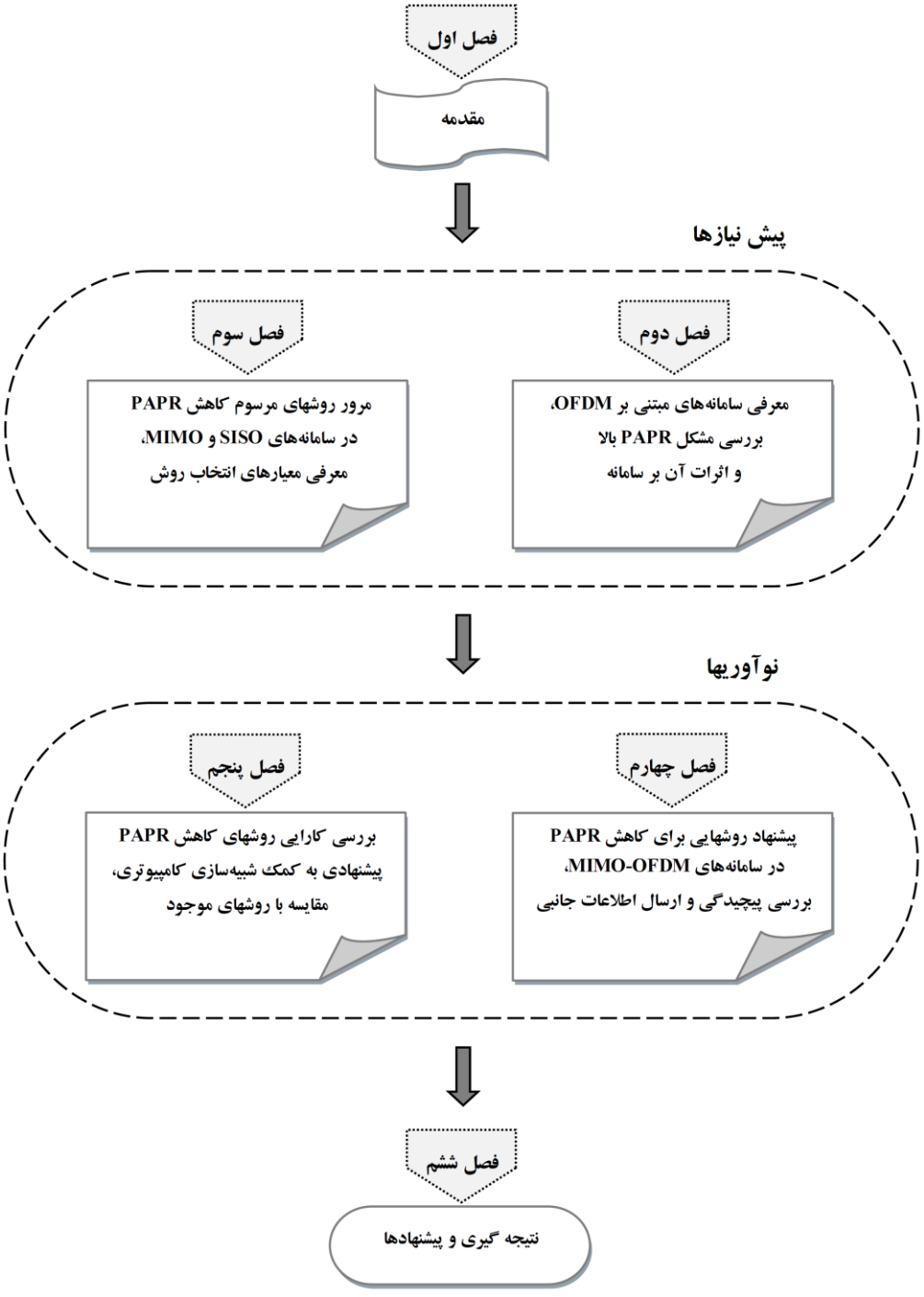
در **فصل چهارم**، روشهای جدید کاهش PAPR در سامانه‌های MIMO-OFDM به عنوان نوآوری پایان‌نامه معرفی می‌شود. این روشها طی چهار مرحله انجام می‌گردد. الف) بلوکهای OFDM در هر آنتن ارسال به چند زیربلوک متمایز افراز می‌شود. ب) با استفاده از پردازش فضایی، مجموعه زیربلوکهای مختلفی در هر آنتن ارسال تولید می‌گردد. ج) پردازش زمانی، دنباله‌های نامزد متفاوتی را در هر آنتن تولید می‌کند و د) دنباله‌ای که کمترین PAPR را دارد به عنوان سیگنال ارسالی در هر آنتن انتخاب می‌شود. پس از معرفی روشهای پیشنهادی، چگونگی

[۱] Complementary cumulative distribution function

ارسال اطلاعات جانبی و تأثیر آن بر نرخ خطای بیت سامانه بررسی می‌گردد. در پایان این فصل، پیچیدگی روشهای پیشنهادی بررسی شده و با پیچیدگی روشهای موجود، مقایسه می‌شود.

در **فصل پنجم**، ابتدا فرضها و پارامترهای شبیه‌سازی بیان می‌شود و سپس نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری روشهای پیشنهادی آورده می‌شود. در این فصل، تعدادی از روشهای موجود نیز شبیه‌سازی می‌شود تا عملکرد آنها با روشهای پیشنهادی مقایسه گردد. نتایج شبیه‌سازیها کارامدی روشهای پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در **فصل ششم**، نتایج اصلی پژوهش، جمع بندی می‌شود. کارامدی، عملکرد بهتر نسبت به روشهای موجود و کاهش پیچیدگی محاسباتی روشهای پیشنهادی، از جمله نتایجی است که در این فصل بیان می‌شود. سرانجام، گامهایی برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱-۱- ساختار کلی پایان‌نامه