۲۰ /۹/ ۳۷۸

دانشگاه تهران

دانشکدهٔ فنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیم مدیریت

# بررسی تحلیلی ساختار فاصله‌ای و عملکرد توربوکدها(Turbo Codes)

*پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد*

*مهندسی برق، گرایش مخابرات*

۱4432

توسط : علیرضا نبی‌زاده

زیر نظر : دکتر حمیدرضا جمالی

مرداد ۱۳۷۸

۲۷۵۲۷

# بررسی تحلیلی ساختار فاصله‌ای و عملکرد توربو کدها(Turbo Codes)

*پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد*

*مهندسی برق، گرایش مخابرات*

**توسط : علیرضا نبی‌زاده**

از این پایان نامه در تاریخ ۱۳۷۸/۵/۳۰ در مقابل هیأت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: جناب آقای دکتر محمّدعلی بنی هاشمی

مدیر گروه آموزشی: جناب آقای دکتر محمود کمره ای

نماینده تحصیلات تکمیلی گروه: جناب آقای دکتر محمود کمره ای

استاد راهنما: جناب آقای دکتر حمیدرضا جمالی

عضو هیأت داوران : سرکار خانم دکتر معصومه نصیری کناری

عضو هیأت داوران : جناب آقای دکتر ناصر رضایی

عضو هیأت داوران: جناب اقای دکتر محسن شیوا

۲۷۵۳۷

تقدیم به پدر و مادر گرامی

که همواره مدیون زحماتشان هستم

و تقدیم به تمام کسانی که دوستشان دارم.

**با تشکر فراوان از استاد ارجمندم**

**جناب آقای دکترحمیدرضا جمالی**

**که در علم و اخلاق از ایشان بسیار آموختم.**

از اساتید محترم،

سرکار خانم دکتر معصومهٔ نصیری کناری، جناب آقای دکتر ناصر رضایی و جناب آقای دکتر محسن شیوا، که با وجود مشغلهٔ فراوان داوری این پایان‌نامه را تقبل فرمودند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنم.

از دوستان عزیزم،

سرکار خانم اردشیرپور، آقایان فاضلی، مرندیان، نعمتی و هوشیار که همراهی و همفکریشان همواره ارزشمند بوده‌است کمال تشکر را دارم.

## چکیده

استفاده از کدینگ، روش مؤثری برای بهبود عملکرد کیفی یک سیستم مخابراتی می‌باشد. کدهای تودرتو به همراه استفاده مناسب از اینترلیور بین انکدرهای مختلف آن مبنای تشکیل مجموعه کدهای جدیدی هستند که دارای بهره بسیار نزدیک به حد تئوری شانون می‌باشند و با وجود این روش دیکدینگ تکراری عملی، برای آنها وجود دارد. هدف از این تحقیق بررسی ساختار فاصله‌ای این دسته کدها و امکان تعمیم و بهبود عملکرد آنها می‌باشد. اساس کار این تحقیق بر مبنای استفاده از یک نگاشت خطی بجای جایگشت بوسیله اینترلیور می‌باشد.

در فصل دوم این گزارش با بیان قضایای کدینگ حد نهایی ظرفیت کانال را معرفی کرده و سپس با بهترین کد ممکن با روش بسته‌بندی کروی مقایسه می‌کنیم. عملکرد این کد معیاری برای کامل بودن کدها می‌باشد و نشان می‌دهیم که توربوکدها برای یک بازه وسیع از طول بلوک با اختلاف $0.7^{dB}$ از این کران فاصله دارند. از آنجائیکه متوسط عملکرد تمام کدهای با طول بلوک و نرخ یکسان نیز با این کران پایین مطابقت دارد ، توزیع وزنی متوسط این کدها نیز می‌تواند به عنوان معیار کامل بودن مطرح گردد. نشان می‌دهیم که در حالت استفاده از نگارنده می‌توان با دقت بیشتری به این معیار نزدیک شد.

در فصل سوم نیز با استفاده از روش‌های دیکدینگ تکراری استاندارد برای توربوکدها و قضایای مربوط به روش Minimum Cross Entropy، روش دیکدینگ تعمیم یافته‌ای برای حالت کلی استفاده از نگاشت بدست می‌آوریم و در انتها در فصل چهارم برای یک توربوکد (1, 7/5, 7/5) نشان می‌دهیم که استفاده از نگاشت با افزایش پیچیدگی کمتر از 15% می‌تواند در احتمال خطای $10^{-6}$ بهره‌ای بیش از $1^{dB}$ ایجاد کند .

علیرضا نبی‌زاده

مرداد ۱۳۷۸

# بررسی تحلیلی ساختار فاصله‌ای و عملکرد توربوکدها

## فهرست مطالب


**۱ معرفی کدهای تودرتو ..... ۱**

۱ - ۱ پیشینهٔ کدهای تودرتو ..... ۲

۱ - ۲ معرفی توربوکدها ..... ۴

۱ - ۳ خانوادهٔ کدهای کانولوشنال تودرتو ..... ۸

۱ - ۴ ختم کردن دیاگرام ترلیس ..... ۱۰

۱ - ۵ غربال کردن بیت های ارسالی ..... ۱۳

۱ -۶ روش دیکدینگ تکراری برای کدهای کانولوشنال تودرتو ..... ۱۶

**۲ بررسی ساختار فاصله‌ای و عملکرد کدهای تودرتو ..... ۱۹**

۲ - ۱ قضیهٔ کدینگ ..... ۲۰

۲ - ۱ - ۱ ظرفیت کانال ..... ۲۰

۲ - ۱ - ۲ بررسی کران پائین برای عملکرد کد با استفاده از روش بسته‌بندی کروی ..... ۲۴

۲ - ۱ - ۳ بررسی متوسط عملکرد کد برای کانال با ورود پیوسته ..... ۲۵

۲ - ۱ - ۴ بررسی متوسط عملکرد کد برای کانال با ورودی باینری ..... ۲۶

۲ - ۱ - ۵ مقایسه عملکرد کدهای تو در تو با حد ظرفیت ..... ۲۸

۲ - ۲ بررسی عملکرد کدهای تودرتو ..... ۳۰

۲ - ۲ - ۱ تعاریف اولیه ..... ۳۰

۲ - ۲ - ۲ بررسی عملکرد کدهای تودرتوی موازی بلوکی ..... ۳۲

۲ - ۲ - ۳ بررسی عملکرد کدهای تودرتوی موازی کانولوشنال ..... ۳۵

۲ - ۲ - ۴ روش بدست آوردن تابع تبدیل کدهای کانولوشنال ..... ۳۷

**۳ بررسی روش دیکدینگ ..... ۴۲**

۳ - ۱ الگوریتم دیکدینگ Symbol MAP ..... ۴۴

۳ - ۱ - ۱ مدل سیستم ..... ۴۴

۳ - ۱ - ۲ دیاگرام ترلیس ..... ۴۵

۳ - ۱ - ۳ الگوریتم دیکدر ..... ۴۶

۳ - ۲ بکارگیری الگوریتم های دیکدینگ با خروجی نرم در دیکدینگ تکراری کدهای تودرتو ..... ۴۸

۳ - ۳ روش Minimum Cross Entropy (MCE) ..... ۵۳

۳ - ۳ - ۱ تعریف ..... ۵۳

۳ - ۳ - ۲ استفاده از MCE در دیکدینگ کدهای بلوکی ..... ۵۴

۳ - ۳ - ۳ بررسی الگوریتم های تکراری با استفاده ازMCE ..... ۵۷

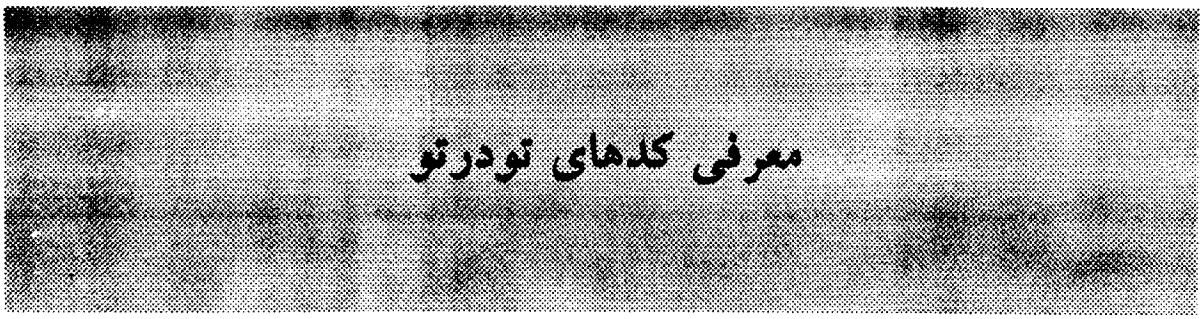
۳ - ۴ تعمیم الگوریتم دیکدینگ تکراری برای دیکدینگ کدهای تودرتو با استفاده از نگاشت ..... ۶۰

۳ - ۴ - ۱ ساختار دیکدر ..... ۶۰

۳ - ۴ - ۲ الگوریتم دیکدینگ برای قید $\underline{u'} = \underline{u}\Pi$ ..... ۶۱

**۴ طراحی نگارنده و بررسی مقایسه‌ای سیستم جدید با توربوکدها ..... ۶۳**
۴ - ۱ اصول طراحی کدهای تودرتوی موازی ..... ۶۴
۴ - ۲ بررسی روش طراحی نگارنده ..... ۶۷
۴ - ۲ - ۱ منبع بروز خطا در دیکدینگ ..... ۶۷
۴ - ۲ - ۲ الگوریتم طراحی نگارنده ..... ۶۸
۴ - ۳ بررسی پیچیدگی روش دیکدینگ ..... ۶۹
۴ - ۳ - ۱ پیچیدگی الگوریتم Symbol MAP ..... ۷۰
۴ - ۳ - ۲ پیچیدگی دیکدینگ نگارنده ..... ۷۰
۴ - ۳ - ۳ مقایسه برای یک مثال عملی ..... ۷۱
**۵ نتیجه گیری و پیشنهادها ..... ۷۳**
۵ - ۱ نتیجه‌گیری ..... ۷۴
۵ - ۲ پیشنهادها ..... ۷۶
**مراجع ..... ۷۸**

# فصل اول



# ۱ معرفی کدهای تودرتو

در سالهای اخیر با توسعهٔ سیستم‌های مخابراتی و نیاز به شبکه‌های پرظرفیت برای ارسال، دریافت و ذخیره‌سازی اطلاعات، تقاضا برای سیستم‌های انتقال دادهٔ مطمئن و کارآمد بطور روزافزون افزایش یافته است.

در سال ۱۹۴۸ شانون نشان داد که خطا در ارسال اطلاعات با نرخ کمتر از ظرفیت، برای یک کانال با نویز مشخص می‌تواند به هر اندازه دلخواه کوچک شود مشروط به اینکه یک روش برای کدینگ بهینه اطلاعات بدست آوریم.

تئوری کدینگ مهم‌ترین ابزاری است که در جهت رسیدن به یک تعادل در پارامترهای یک سیستم مخابراتی دیجیتال نظیر طیف فرکانسی اشغال شده، توان مورد نیاز و کیفیت عملکرد سیستم، به کار می‌رود. برای رسیدن به یک سیستم کارآمد برای یک کاربرد مشخص، طراحی و انتخاب کدهای مناسب از مهم‌ترین مراحل طراحی سیستم انتقال مخابراتی به شمار می‌رود.

در راستای تحقیقات انجام شده برای رسیدن به یک سیستم با کیفیت بالا و با پیچیدگی مناسب برای دیکدینگ، روش‌های متنوعی پیشنهاد شده‌اند[۱] که در این میان کدهای تودرتو، مهم‌ترین دستاورد این تحقیقات بوده‌اند و در طی سال های اخیر کاربردهای فراوانی در سیستم‌های عملی داشته‌اند. توربو کدها نیز زیر شاخه‌ای از کدهای تودرتو هستند که بطور هوشمندانه‌ای بطور بهینه از اجزای سیستم استفاده کرده‌اند.

در این فصل ضمن معرفی این خانواده از کدها، به بررسی و معرفی بخش‌های مختلف آن‌ها می پردازیم .

## ۱ -۱ پیشینهٔ کدهای تودرتو

از تئوری اطلاعات به خوبی می دانیم که عملکرد کدهایی با طول بلوک بسیار بزرگ که به صورت تصادفی از فضای سیگنال انتخاب شده باشند ، طبق فرضیهٔ کدینگ تصادفی به حد ظرفیت شانون میل می‌کنند[Woz65]. عمل دیکدینگ این کدها بر مبنای معیار حداکثر شباهت ML[۲] از نظر پیچیدگی با افزایش طول بلوک، به صورت نمایی افزایش می‌یابد و به سرعت به حدی می‌رسد که امکان پیاده سازی عملی آن مقدور نخواهد بود.

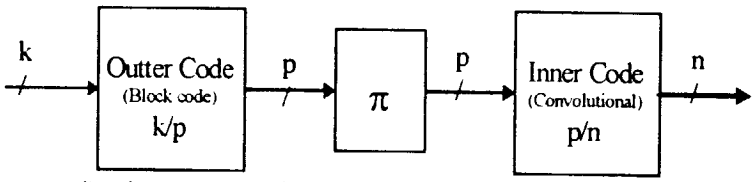
در سال ۱۹۶۶ ، Forney نشان داد که با توزیع عمل دیکدینگ مابین چند دیکدر، می‌توان افزایش پیچیدگی سیستم را تقریباً به صورت خطی با بهبود کیفی عملکرد متناسب قرار داد[For66]. او همچنین روش مناسبی

---

[۱] کدهای حاصل ضربی (Product codes) ، تکرارشده (Iterated) ، تودرتو(Concatenated) و خانوادهٔ تعمیم یافتهٔ آن (Extended Concatenation) از این جمله هستند.

[۲] Maximum Likelihood

جهت ترکیب و انتخاب مناسب انکدرها ارائه نمود . مطالعات وی گامی موثر در جهت رسیدن به عملکرد کیفی مناسب در یک سیستم مخابراتی با پیچیدگی قابل قبول به شمار می رود و امروزه روش Forney در قراردادن متوالی انکدرها ، با نام کدهای تودرتو شناخته شده است. هدف از طراحی چنین کدهایی ، رسیدن به کدهایی خطی با طول معادل طولانی و فاصلهٔ همینگ زیاد بود که بنابر تئوری ظرفیت شانون، ضمن ارائهٔ عملکرد کیفی مناسب از پیچیدگی دیکدینگ کمتری برخوردار باشند .




*شکل ۱-۱ : ساختار عمومی کدهای تودرتو با دو انکدر بلوکی و کانولوشنال*

در شکل (۱-۱) ساختار عمومی کدهای تودرتو نشان داده شده است. در این شکل از دو انکدر مستقل استفاده شده که در آن کد خارجی یک کد بلوکی و کد داخلی یک کد کانولوشنال است. دو انکدر توسط اینترلیور $\pi$ با یکدیگر در ارتباط هستند.

مطالعهٔ عملکرد کدهای کانولوشنال و کدهای بلوکی نشان داده است که عملکرد کدهای کانولوشنال در سیگنال به نویزهای پایین بهتر از عملکرد کدهای متناظر بلوکی است. از طرفی با افزایش سیگنال به نویز و بهبود وضعیت کانال ، عملکرد کدهای بلوکی به سرعت بهبود می‌یابد و با توجه به شیب تند منحنی احتمال خطا، برتری محسوسی نسبت به کدهای کانولوشنال ارائه می‌کند. این خاصیت بخشی از ماهیت ذاتی این کدها محسوب می‌شود و ریشه در نحوهٔ توزیع کلمات کد در فضای سیگنال سیستم کدشده دارد. در کدهای کانولوشنال میزان فاصلهٔ همینگ حداقل کد نسبت به کد بلوکی متناظر معمولا کمتر است و چون در نواحی SNR های بالا عملکرد کد به صورت نمایی با فاصلهٔ همینگ حداقل کد متناسب است، بنابراین در این نواحی عملکرد کدهای بلوکی بهتر خواهد بود.

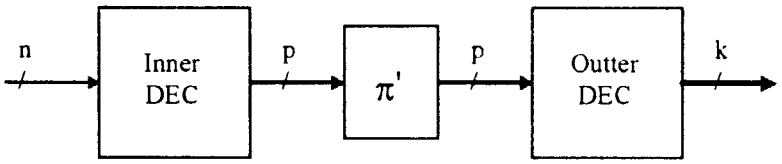
با این وجود در سیگنال به نویزهای پایین‌تر، عملکرد کد به تعداد کلمات کدی که دارای فاصلهٔ همینگ حداقل هستند، وابسته است. این میزان را در تئوری کدینگ، چندگانگی کد می‌نامند. با توجه به چندگانگی زیاد برای کلمات کد با وزن همینگ حداقل در کدهای بلوکی، عملکرد این کدها در سیگنال به نویزهای پایین افت زیادی دارد.

می‌توان از خواص متفاوت کدهای کانولوشنال و کدهای بلوکی در طرح کدهای تودرتوی مناسب بهره گرفت. در کدهای تودرتو، کد داخلی مستقیما با کانال در ارتباط است و وظیفهٔ آن تصحیح خطاهایی است که مستقیما در روی کلمات این کد در کانال رخ می‌دهد. کد خارجی نیز کلمات دیکد شدهٔ کد داخلی را دریافت می‌کند و بخشی از خطاهای آشکارسازی دیکدر داخلی را تصحیح می‌کند. واضح است که در این

ساختار کد داخلی با سیگنال به نویز ورودی ضعیف‌تری در ورودی خود مواجه است و این کد باید به نحوی انتخاب شود که در این ناحیه از سیگنال به نویز، عملکرد بهتری داشته باشد. در این حالت کدهای کانولوشنال خواص مناسب تری برای ارضای این شرط دارند.

کد خارجی وضعیت متفاوتی نسبت به کد داخلی دارد و با توجه به توان تصحیح کد داخلی، سیگنال به نویز مناسب‌تری در ورودی دیکدر خود مشاهده می‌کند. بنابراین کد خارجی باید به نحوی انتخاب گردد که در ناحیه سیگنال به نویزهای بالاتر، عملکرد بهتری داشته باشد و بنابراین استفاده از کدهای بلوکی به عنوان کد خارجی توصیه می‌شود.

از طرفی عمل دیکدینگ و به ویژه روش‌های آشکارسازی MLSE که در مورد کدهای کانولوشنال استفاده می‌شوند، دارای ماهیت تولید خطاهای خوشه‌ای هستند و بنابراین برای پخش خطاهای خوشه‌ای و استفادهٔ مناسب از توان تصحیح کدخارجی، از اینترلیور استفاده می‌شود. نمای کلی از کدهای تودرتو به صورت توالی کدهای بلوکی و کانولوشنال در شکل(۱-۱) نشان داده شد. ساختار گیرندهٔ کدهای تودرتو نیز در شکل (۱-۲) ارائه شده است. در این شکل نیز $\pi'$ بیانگر دی اینترلیور است.



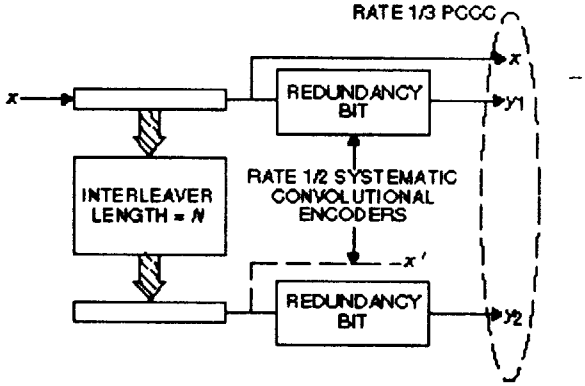

شکل ۱-۲ : ساختار عمومی دیکدرهای تودرتو با گیرندهٔ غیر تکراری

تا قبل از معرفی توربوکدها، نقش اینترلیور در کدهای تودرتو فقط از جنبهٔ پخش خطاهای خوشه‌ای دیکدر داخلی شناخته شده بود و به تاثیر مهم آن در توزیع وزنی کلمات کد پرداخته نمی‌شد. لیکن معرفی توربوکدها نشان داد که اینترلیور دارای نقشی اساسی در کدهای تودرتو است. استفاده از گیرنده‌های تکراری مناسب نیز در این کدها نشان داد که گیرنده های متداول غیرتکراری، گیرنده‌های بهینه برای این سیستم‌ها به‌شمار نمی‌آیند و استفاده از گیرنده های تکراری تنها روش عملی برای میل به حد نهایی عملکرد این کدها با طول بلوکی معادل آنهاست.

## ۱-۲ معرفی توربوکدها

در سال ۱۹۹۳ در کنفرانس بین المللی مخابرات در سوئیس، برای نخستین بار ایدهٔ توربوکدها طی یک مقاله توسط سه محقق فرانسوی معرفی شد [Ber93]. در این مقاله روشی جدید برای طراحی کدهایی با توان تصحیح بالا ارائه شده بود که از دو کد کانولوشنال و یک اینترلیور بیت بهره می‌برد.

همچنانکه در فصل چهارم این گزارش خواهیم دید در توربوکدها به جهت رسیدن به چندگانگی مناسب و حداکثر کردن حداقل فاصلهٔ همینگ، انکدرهای تشکیل دهنده از نوع بازگشتی و سیستماتیک انتخاب می‌شوند. در این کدها بیت های داده مستقیما وارد انکدر تشکیل دهندهٔ اول می‌شوند. بدین ترتیب در این انکدر بیتهای سیستماتیک و بیتهای پریتی اول حاصل می‌شوند. همچنین بیت های داده وارد اینترلیور شده و پس از جایگشت رشتهٔ دادهٔ ورودی، بیت‌های داده وارد انکدر دوم شده و پریتی دوم محاسبه می‌شود.



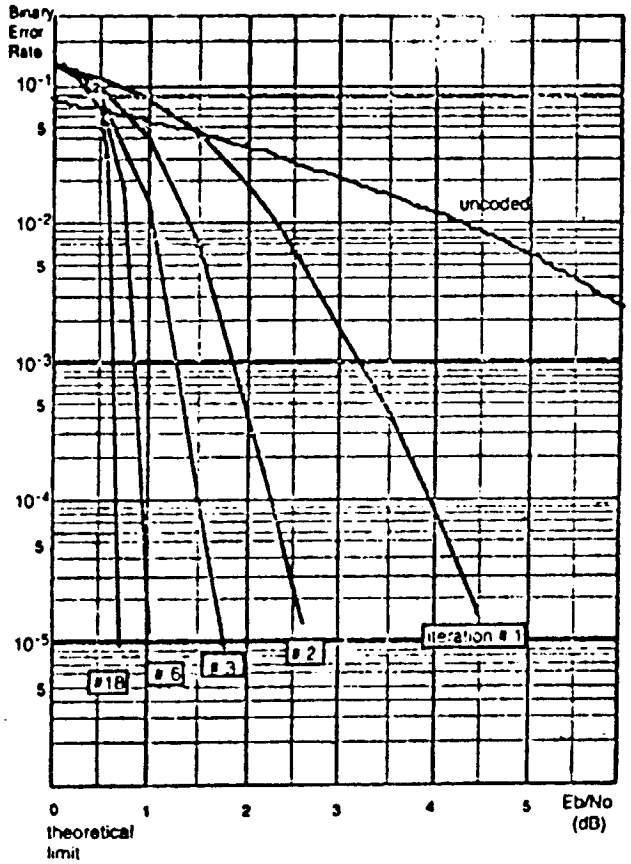

*شکل ۱-۳ : ساختار کلی توربو کدها با دو انکدر تشکیل دهندهٔ کانولوشنال*

در شکل (۱-۳) ساختار عمومی توربوکدها نشان داده شده است. در این شکل انکدرهای تشکیل دهنده ، کدهای کانولوشنال بازگشتی سیستماتیک با نرخ R= ۱/۲ انتخاب شده اند. در این شکل $\pi$ بیانگر اینترلیور بیت است.

در حالت کلی می‌توان توربوکدها را شکل خاصی از کدهای تودرتو دانست که در آن انکدرهای تشکیل دهنده به صورت موازی قرار گرفته اند. نتایج شبیه سازی ارائه شده برای توربوکدها در مرجع مورد نظر، در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. در این شبیه سازی از کدهای تشکیل دهنده‌ای با چهار حافظه و چند جمله‌ای مولد زیراستفاده شده است:

$$G(D)=\left[1\ ;\frac{1+D}{1+D\ +D^2+D^3+D^4}\right]$$

همچنین به جهت کاهش نرخ کد و بهره‌وری بیشتر عرض باند، از روش غربال کردن نیز در این کدها استفاده شده بود. بدین ترتیب که به صورت ترتیبی هر یک از پریتی‌های اول و دوم یک در میان حذف می‌شدند:

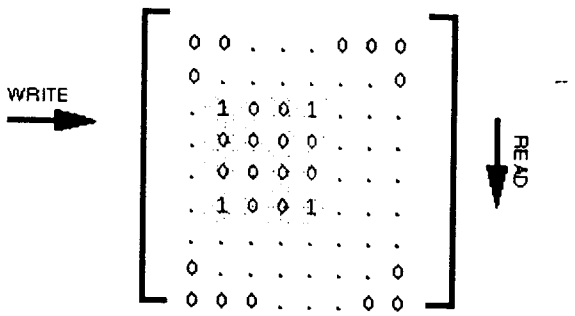



*شکل ۱-۴ : منحنی احتمال خطای بیت برای توربوکد با کدهای تشکیل دهندهٔ ۱۶ حالته و اینترلیور N=65526*

این منحنی ، عملکرد توربوکدها را در کانال گوسی و با تعداد تکرارهای متفاوت نشان می‌دهد. در این منحنی به ازای تکرار هجدهم، در سیگنال به نویز $0.7^{dB}$، احتمال خطای $۱۰^{-۵}$ حاصل می‌شود. مقایسهٔ این نتیجه با حد ظرفیت شانون، نشان می‌دهد که این سیستم با ظرفیت نهایی تعیین شده برای کانال در حدود $0.6^{dB}$ فاصله دارد. این نتیجهٔ ممتاز از عملکرد توربوکدها باعث جلب توجه بسیاری از محققین در زمینهٔ تئوری اطلاعات و کدینگ شد و روند گسترده‌ای از تحقیقات در این زمینه آغاز شد.

در کدهای کانولوشنال بازگشتی دنبالهٔ ورودی با وزن یک، دنباله‌ای با وزن نامحدود در خروجی ایجاد می‌کند. بنابراین کمترین وزنی که می‌تواند یک حادثهٔ خطا با طول محدود تولید کند برابر ۲ می‌باشد. حال فرض کنید چنین رشته‌ای از داده های ورودی با وزنی برابر دو وارد انکدر توربوکد گردد. با یک طراحی خوب برای اینترلیور، پس از ورود چنین رشته‌ای به اینترلیور، جایگشت جدیدی از این رشته تولید می‌شود که بیت‌های یک در آن چنان پخش هستند که وزن خروجی متناظر با آن در انکدر دوم بسیار زیاد خواهد بود. برای یک اینترلیور تصادفی با احتمال خیلی ضعیف بعضی از این الگوها در هر دو انکدر تولید وزن کم می‌کنند که باز هم بدلیل چندگانگی کم برای چنین کلماتی، احتمال خطا نسبت به سیستم بدون اینترلیور به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد[Ben96a]. این حالت برای رشته‌هایی از ورودی با وزن بیشتر از دو نیز

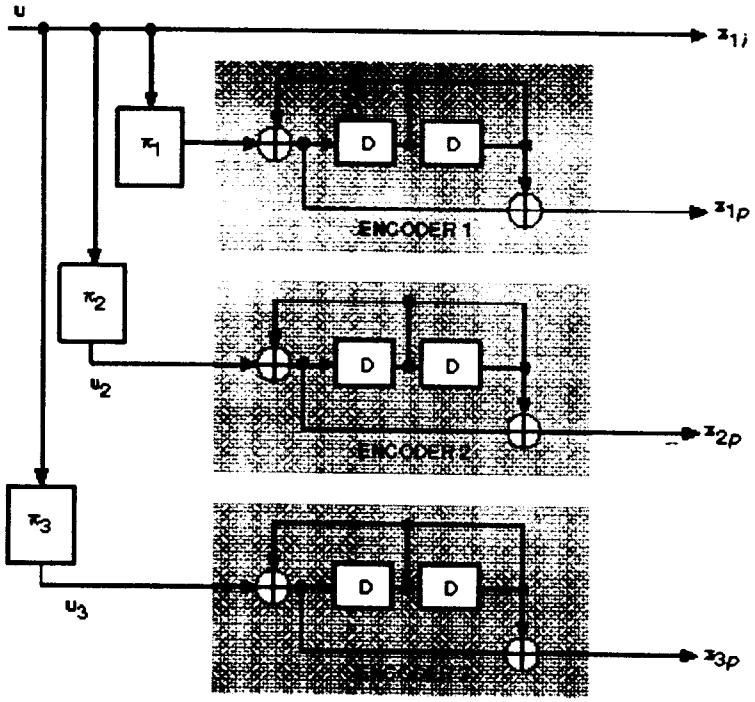
صادق است. این نوع استدلال بر مبنای فرض آشکارسازی ML معتبر است و فرض می کنیم که دیکدر چنین کدهایی بتواند بر حسب خروجی توربوکدها، برای تصمیم گیری از کلیهٔ بیت‌های دریافتی به صورت یک جا استفاده نماید. در شکل (۱-۵) یک نمونه اینترلیور بلوکی آورده شده است. اطلاعات به صورت سطری در ماتریس نوشته شده و به صورت ستونی خوانده می‌شوند. همانگونه که ملاحظه می‌کنید الگوهای ورودی به صورت نمایش داده شده، پس از خروج از اینترلیور باز هم الگوی متناظر با حادثهٔ خطای با وزن کم هستند. در عمل به راحتی می‌توان از انتخاب چنین اینترلیورهایی اجتناب کرد.




*شکل ۱-۵: یک مثال از اینترلیور بلوکی که قادر به پخش دنبالهٔ ورودی با وزن ۲ نیست*

در توربو کدها ، نقش اینترلیور در تولید جایگشتی جدید از رشتهٔ ورودی که ساختار فاصله ای متفاوتی نسبت به رشتهٔ اصلی داشته باشند، بسیار مهم است و هر چه این تفاوت در توزیع وزنی بیشتر باشد می‌توان عملکرد بهتری از توربوکدها انتظار داشت. نوع و ساختار این اینترلیورها از موضوعات مهم تحقیقاتی در زمینهٔ توربوکدها به شمار می‌آید.

همچنین یکی از روش‌های افزایش کارایی توربوکدها، افزایش تعداد انکدرهای تشکیل دهنده و اینترلیورها است. چنین ساختاری از توربو کدها با نام توربوکد چندگانه یا Multiple Turbo Codes شناخته شده است. شکل(۱-۶) یک نمونه از این کدها را با سه انکدر تشکیل دهنده نشان می‌دهد.
استفاده از این کدها علیرغم بهبود عملکرد کیفی سیستم، به علت پریتی‌های بیشتر باعث کاهش نرخ ارسال می‌گردد. در این حالت استفاده از تکنیک‌های مناسب غربال کردن، بسیار سودمند است و یافتن روش‌های بهینه در روند غربال کردن نیز یکی از موضوعات تحقیقاتی در زمینهٔ توربوکدهاست. همچنین استفاده از توربوکدهای چندگانه نیاز به ارائهٔ روش‌های مناسب برای طراحی گیرنده دارد که نسبت به سایر توربوکدها از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. در این کدها ساختار گیرنده در میزان تاخیر دیکدینگ، سرعت همگرایی و پیچیدگی سیستم نقش موثری دارد. در بخش (۱-۶) به طور خلاصه انواع ساختارها را بررسی می‌کنیم. برای مطالعات تکمیلی در این موضوع می توان به مرجع [Div95a] رجوع کرد.




*شکل ۱-۶ : ساختار یک توربوکدچندگانه با سه انکدر تشکیل دهندهٔ ۴ حالته*

عملکرد قابل توجه توربوکدها باعث شد که از ابتدای معرفی این کدها ، تحقیقات گسترده‌ای روی این کدها انجام شد. نتیجهٔ این تحقیقات معرفی خانوادهٔ تعمیم یافته ای از کدهای تودرتو است که توربوکدها ، بخشی از آن را شامل می‌شوند.

## ۱ -۳ خانوادهٔ کدهای کانولوشنال تودرتو

بررسی تحلیلی توربوکدها و به ویژه نقش موثر اینترلیور در عملکرد این کدها نشان داد که می‌توان از خواص اینترلیور برای کاهش چندگانگی متوسط و همچنین افزایش فاصلهٔ همینگ حداقل کدها در ساختارهایی غیر از توربوکدها نیز بهره برد. امروزه کدهای تودرتو به چهار زیرخانوادهٔ عمده زیر تقسیم شده‌اند:

۱- کدهای تودرتوی موازی (یا Parallel Concatenated Codes)

۲- کدهای تودرتوی متوالی (یا Serial Concatenated Codes)

۳- کدهای تودرتوی دورگه (یا Hybrid Concatenated Codes)

۴- کدهای تودرتوی خودتوالی (یا Self Concatenated Codes)

توربوکدها از زیرخانوادهٔ کدهای تودرتوی موازی با انکدرهای تشکیل دهندهٔ کانولوشنال می‌باشند. کدهای تودرتوی متوالی نیز حالت تعمیم یافته‌ای از کدهای تودرتویی است که قبلا توسط Forney معرفی شده بود.