تحلیل و مدل‌سازی اتصالات گاردان

نگارندگان

دکتر محمدرضا قضاوی **دکتر مسعود سلطان‌رضائی**

۱۳۹۹

سرشناسه: قضاوی، محمدرضا، ۱۳۳۳-
عنوان و نام پدیدآور: تحلیل و مدل‌سازی اتصالات گاردان / نگارندگان محمدرضا قضاوی، مسعود سلطان‌رضائی.
مشخصات نشر: تهران: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۲۳۹ ص.: مصور(بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۳٤-۱۷-۲
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: کتابنامه:ص.[۲۰۵]-۲۰۹. واژه‌نامه. نمایه.
موضوع: اتومبیل‌ها -- قطعات -- طرح و ساختمان Automobiles -- Parts -- Design and construction
موضوع: اتومبیل‌ها -- قطعات -- شناسایی Automobiles -- Parts -- Identification
موضوع: اتومبیل‌ها -- نگهداری و تعمیر Automobiles-- Maintenance and repair
شناسه افزوده: سلطان‌رضائی، مسعود، ۱۳٦٦-
شناسه افزوده: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس
رده بندی کنگره: TL۱۵۹
رده بندی دیویی: ٦۲۹/۲۵
شماره کتابشناسی ملی: ۷۵٤٤۰۷۸

تحلیل و مدل‌سازی اتصالات گاردان

نگارندگان: دکتر محمدرضا قضاوی و دکتر مسعود سلطان‌رضائی
ویراستار ادبی و فنی: سید مصطفی فیض بخش
طراح جلد: ترنج
صفحه‌آرایی: سمیه زهانی
شماره انتشار: ۲۷۰
شماره پیاپی: ٤۱٤
تاریخ انتشار: ۱۳۹۹
شمارگان: ۵۰۰
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۳٤-۱۷-۲ **شابک الکترونیکی:** ۹۷۸-۶۲۲-۸۳۷٦-۱٦-۵
ناشر: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس
نوبت چاپ: اول
کارشناس اجرایی: لیلا نجفی زمان
ناظر چاپ: مصطفی جانجانی
لیتوگرافی: ایران گرافیک
چاپ و صحافی: قشقایی
مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های آل‌احمد و دکتر چمران، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۳۱۸-۱٤۱۱۵
تلفن: ۸۲۸۸۳۰۹٦
دورنگار: ۸۲۸۸۳۰۳۲
آدرس اینترنتی فروش: pub.Modares.ac.ir

مسئولیت صحت مطالب کتاب برعهدهٔ نگارندگان است.

تمام حقوق این اثر برای مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس محفوظ است و تکثیر کتاب به هر روشی بدون اجازه کتبی ناشر موجب پیگرد قانونی می‌شود.

تقدیم

به تمام کسانی

که دلسوزانه و مخلصانه

در راه اعتلای این سرزمین

کوشش و پایداری نمودند

فهرست مطالب

پیشگفتار نگارندگان ..... ه
مقدمه ۱
۱- مقدمه‌ای بر کوپلینگ‌ها ۵
۱-۱ کوپلینگ‌ها ۵
۱-۱-۲ کاربردهای کوپلینگ ٦
۱-۱-۳ انواع کوپلینگ ٦
۷-۲ ترازبندی محورها در ماشین‌آلات دوار ۲۱
۷-۲-۱ انواع ناهم‌راستایی ۲۱
۷-۲-۲ الزامات و آثار وجود ناهم‌راستایی (عدم ترازبندی) ۲۱
۷-۲-۳ آزمون‌های ناهم‌راستایی ۲۳
۷-۳ تفاوت کوپلینگ و اتصال (مفصل) ۲۵
۷-٤ اتصالات (مفصل‌ها) ۲۵
۷-۵ انواع روش‌های انتقال قدرت ۳۱
۷-۵-۱ سیستم محور ۳۳
۷-۵-۲ پیشینهٔ سیستم محور و اتصال یونیورسال ۳۵
تمرین‌های پایان فصل ٤۰
۲- کاربرد اتصالات گاردان ٤۱
۲-۱ محاسن اتصال گاردان ٤۱
۲-۲ موارد کاربرد اتصال یونیورسال ٤۲

۲-۲-۱ وسایل نقلیه ٤۲
۲-۲-٤ رباتیک ٥۱
۲-۲-٥ مهندسی-پزشکی و بیومکانیک ٥۳
۲-۲-٦ کاربردهای دیگر ٥٥
۲-۳ نکات تکمیلی دربارهٔ به‌کارگیری اتصالات یونیورسال ٥۸
تمرین‌های پایان فصل ٦۰
۳- انواع اتصالات گاردان ٦۳
۳-۱ اجزای اتصال گاردان ٦۳
۳-۲ پارامترهای طراحی و مدل‌سازی اتصال یونیورسال ٦٥
۳-۲-۱ استحکام اتصال یونیورسال ٦٦
۳-۲-۲ اینرسی ٦۸
۳-۲-۳ لقی ٦۸
۳-۲-۳ موارد دیگر ٦۹
۳-۳ دسته‌بندی اتصالات یونیورسال ۷۲
۳-۳-۱ اندازه و بار انتقالی مفصل ۷۲
۳-۳-۲ اتصال یونیورسال صلب و انعطاف‌پذیر ۷۳
۳-۳-۳ نوع میل‌گاردان ۷٥
۳-۳-٤ انواع مختلف یوک و چهارشاخه ۷٦
۳-۳-٥ روش تولید و نگهداری چهارشاخه و یوک ۷۸
۳-٤ سرعت انتقالی توسط مفصل ۸۰
۳-٤-۱ مفصل‌های سرعت ثابت ۸۰
۳-٤-۲ مکانیزم‌های سازگار ۸۹
تمرین‌های پایان فصل ۹۳
٤- مدل‌سازی ریاضی اتصالات گاردان ۹٥
٤-۱ فرضیات ۹٦
٤-۲ پیش‌فرض‌ها ۹٦

٤-٣ استخراج روابط ٩٦
٤-٤ منحنی نسبت سرعت انتقالی ١٠٠
٤-٥ درجات آزادی سیستم محور ١٠٤
٤-٦ زوایای معمول به‌کارگیری ١٠٦
٤-٧ تحریک پارامتریک و تشدید ١٠٨
تمرین‌های پایان فصل ١١٣
٥- اتصالات گاردان در وسایل نقلیه ١١٥
٥-١ اشاره‌ای به سینماتیک مکانیزم گاردان دوتایی ١١٥
٥-٢ مکانیزم گاردان دوتایی سرعت ثابت ١١٧
٥-٢-١ سرعت دورانی ورودی ثابت ١١٧
٥-٢-٢ هم‌صفحه بودن محور پیرو با محور راننده ١١٨
٥-٢-٣ برابر بودن زاویهٔ دو مفصل ١١٩
٥-٢-٤ یکسان بودن زاویهٔ یوک‌ها ١٢٠
٥-٢-٥ چیدمان محورها ١٢٠
٥-٣ روابط ١٢٣
٥-٣-١ اتصال گاردان کشویی ١٢٤
٥-٣-٢ ساده‌سازی مکانیزم یونیورسال دوتایی ١٢٨
٥-٣-٣ اتصال دوتایی سرعت ثابت تراکتا ١٣٠
٥-٣-٤ دیگر اتصالات مکانیکی سرعت ثابت ١٣٢
٥-٣-٥ اتصال توپی ١٣٥
٥-٣-٦ اتصال توپی ویس ١٣٨
٥-٣-٧ اتصال رزپا ١٤١
تمرین‌های پایان فصل ١٤٣
٦- اتصالات گاردان یونیورسال در ربات‌ها ١٤٥
٦-١ دوران جسم صلب ١٤٥
٦-٢ مدل‌سازی اتصالات متداول در رباتیک ١٥٥

٦-٢-١ مقدمه ١٥٥
٦-٢-٢ بردار و مختصات همگن پلاکر ١٥٦
٦-٢-٣ اتصال مفصلی ١٦١
٦-٢-٤ اتصال انتقالی ١٦٣
٦-٢-٥ اتصال یونیورسال (گاردان) ١٦٤
٦-٢-٦ اتصال استوانه‌ای ١٦٦
٦-٢-٧ اتصال کروی ١٦٨
٦-٢-٨ اتصال صفحه‌ای ١٧١
٦-٣ ترکیب مفصل گاردان با دیگر اتصالات در ربات‌ها ١٧٢
٦-٣-١ دستگاه مختصات منطبق بر محورها ١٧٢
٦-٣-٢ دستگاه مختصات زاویه‌دار با محورها ١٧٦
تمرین‌های پایان فصل ١٨٤
٧- مدل‌سازی نرم‌افزاری اتصالات گاردان ١٨٧
٧-١ مفصل یونیورسال در نرم‌افزار ادمز ١٨٨
٧-١-١ مقدمه ١٨٨
٧-١-٢ مدل‌سازی مفصل هوک در ادمز ١٩١
٧-٢ مفصل یونیورسال در نرم‌افزار متلب ١٩٣
٧-٢-١ مقدمه ١٩٣
٧-٢-٢ مدل‌سازی در سیم‌مکانیک ١٩٥
٧-٢-٣ مفصل‌های تعریف‌شده در سیم‌مکانیک ١٩٧
٧-٢-٤ مدل‌سازی اتصال یونیورسال در سیم‌مکانیک ١٩٩
تمرین‌های پایان فصل ٢٠٢
منابع ٢٠٥
واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی ٢١١
واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی ٢١٧
نمایهٔ موضوعی ٢١٩

پیشگفتار نگارندگان

دربارهٔ خودروهای سبک و سنگین گاهی شنیده می‌شود که «میل‌گاردان برید» و یا «چهارشاخ گاردان شکست»؛ منظور چیست و مهم‌تر از آن، علت چیست؟ به‌منظور انتقال قدرت در جهات گوناگون و بین محورهای مختلف چه راه‌حلی وجود دارد که ساده، مقرون به‌صرفه و با بازدهی بالا باشد؟ اتصال یو (U) که در انواع ربات‌ها به‌طور متداول استفاده می‌شود چه ویژگی‌هایی دارد و چگونه با دیگر اتصالات ترکیب می‌شود؟

همهٔ سؤالات فوق مربوط به یک مکانیزم بسیار رایج در انواع سیستم‌های مکانیکی است، اتصال گاردان. با وجود کاربردهای گستردهٔ اتصالات گاردان، هنوز هیچ کتابی به زبان فارسی وجود ندارد که به‌طور تخصصی به این موضوع پرداخته باشد. متون فارسی که دربارهٔ این اتصالات (به‌طور پراکنده) وجود دارد، به بخش کوچکی از کتب مربوط به خودرو و یا رباتیک محدود می‌شود و در آن‌ها تنها اشاره‌ای گذرا به موضوع شده است.

بررسی اجزا، انواع، کاربردها، پیامدها، ویژگی‌ها و معادلات مربوط به اتصالات گاردان تاکنون مغفول مانده است و جای خالی منابع مدون کاملاً حس می‌شود. این کمبود در صنایع مختلف نیز محسوس است، به‌نحوی که صنعتگران منبع مناسبی در دست ندارند تا به کمک آن رفتار مکانیزم چهارشاخ گاردان را به‌درستی درک کنند و به توانایی‌های خود در زمینهٔ به‌کارگیری از ظرفیت‌های متعدد این اتصال بیفزایند. این مسئله در حالی است که اتصال فوق نه تنها در صنایع گوناگون نظیر اتومبیل‌سازی، واگن و لوکوموتیوسازی، کشتی‌سازی (صنایع دریایی و زیردریایی)، هوافضا (هواپیما، چرخ‌بال و ...)، رباتیک (ربات‌های صنعتی، انسان‌نما و ...)، ماشین‌سازی (ماشین‌آلات کشاورزی، شکل‌دهی و ...) و حفاری کاربردهای فراوانی دارد؛ بلکه در دروس مختلف دانشگاهی از جمله طراحی

مکانیزم‌ها، مکاترونیک، رباتیک، دینامیک، دینامیک ماشین، تئوری حرکت خودرو، هیدرولیک و پنوماتیک، ارتعاشات، کنترل و طراحی اجزای ماشین نیز بررسی می‌شود.

نویسندگان کتاب حاضر با کسب سال‌ها تجربه در محیط دانشگاه‌های ایران و مراکز علمی بین‌المللی، چاپ و ارائهٔ چندین مقالهٔ داخلی و خارجی در مجلات و همایش‌های معتبر و نیز انجام پروژه‌های صنعتی متعدد مرتبط با تحلیل و مدل‌سازی اتصالات گاردان در زمینه‌های مکانیک، رباتیک، مکاترونیک و ... اقدام به نگارش این اثر نموده‌اند. بخش عمدهٔ کتاب، حاصل سال‌ها تجربه، پژوهش و بررسی جنبه‌های مختلف اتصالات گاردان بوده و سعی شده است اطلاعات به‌صورت سامان‌یافته‌ای طبقه‌بندی شود و تا حد امکان مطالب مختلف به‌طور قابل فهم برای عموم ارائه شود. با توجه به نبود آثار و منابع علمی و دانشگاهی به‌صورت مدون و منسجم در زمینهٔ کوپلینگ‌های گاردان یونیورسال، ارزش و اهمیت کتاب پیش‌رو مضاعف می‌شود. از ویژگی‌های این کتاب، ارائهٔ شکل‌های گوناگون و مثال‌های متعدد است که برای فهم بهتر خوانندگان بسیار مفید است. همچنین در پایان هر فصل، تمریناتی آورده شده است که به تثبیت مطالب کمک شایانی می‌کند و راه را برای افراد علاقه‌مند به تحقیق در این زمینه باز می‌کند.

با توجه به مطالبی که در کتاب حاضر ارائه می‌شود، خوانندگان با انواع کوپلینگ‌ها و اتصالات و کاربردهای آن‌ها آشنا خواهند شد. همچنین توضیحات کاملی دربارهٔ مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری اتصال گاردان بیان می‌گردد تا کاربران بتوانند به‌طور تخصصی از آن‌ها بهره‌مند شوند. معرفی کاربرد این اتصال در انواع وسایل نقلیه و نیز ارتباط آن با دیگر اتصالات مکانیکی در ربات‌های مختلف به خوانندگان کمک می‌کند با کاربردهای عملی و صنعتی کوپلینگ گاردان یونیورسال در سیستم‌های مکانیکی رایج بیشتر آشنا شوند.

مخاطبان کتاب حاضر، دانشجویان فنی و مهندسی به‌ویژه در رشته‌های مهندسی خودرو، مکانیک، رباتیک، مکاترونیک، هوافضا، ماشین‌آلات کشاورزی، صنایع، معدن و عمران و

همچنین صنعتگرانی هستند که با مکانیزم‌ها، سیستم‌ها و تجهیزات شامل کوپلینگ یونیورسال سروکار دارند.

کتاب «تحلیل و مدل‌سازی اتصالات گاردان» گامی مؤثر به‌منظور ارتقای علمی صنعتگران، طراحان و دانش‌پژوهان در محیط صنعت و دانشگاه در زمینهٔ مکانیزم‌هاست که در نهایت می‌تواند به رشد فناوری در این سرزمین و فرایند تولید ثروت در بازارهای صنعتی کمک شایانی نماید.

دکتر محمدرضا قضاوی دکتر مسعود سلطان‌رضائی

مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از سیستم‌های مکانیکی، انتقال حرکت است. روش‌های زیادی برای انتقال حرکت وجود دارد که بنابر نیاز و محدودیت‌های عملی، یکی یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود. رایج‌ترین سیستم‌های انتقال قدرت[1] عبارت‌اند از سیستم محور یا شفت و کوپلینگ، تسمه و پولی، چرخ و زنجیر و جعبه‌دنده. متداول‌ترین روش انتقال قدرت، استفاده از سیستم محور است که می‌تواند گشتاور و حرکت را در سرعت‌های بالا نیز منتقل کند. سیستم محور از چند شفت متصل به یکدیگر تشکیل شده است و در آن حرکت دورانی از محور اول به محور(های) بعدی منتقل می‌شود. نحوهٔ نصب و اتصال محورها در شرایط مختلف مهم است؛ زیرا ناهم‌راستایی آن‌ها می‌تواند در سیستم ارتعاشات ناخواسته ایجاد کند.

به‌منظور انتقال حرکت دورانی از محوری به محور دیگر لازم است از اتصالات مکانیکی استفاده شود. در مواردی باید این اتصالات بتوانند فاصله و/یا ناهم‌راستایی بین دو محور مجاور را جبران کنند. به عبارت دیگر، گاهی دو محور با یکدیگر موازی‌اند و با توجه به فاصلهٔ جانبی آن‌ها در یک نقطه تقاطعی ندارند و/یا دو محور با یکدیگر موازی نیستند و بین‌شان زاویه‌ای وجود دارد. در این شرایط از اتصالات و کوپلینگ‌های مکانیکی به‌منظور اتصال دو محور و انتقال حرکت استفاده می‌شود. اتصالات زیادی وجود دارند که با توجه به طراحی آن‌ها هر کدام محاسن و معایب مختلف و کاربرد خاصی دارند. از متداول‌ترین کوپلینگ‌های مکانیکی که توانایی جبران فاصله و ناهم‌راستایی محورهای دوار

---

1. Power transmission systems

را دارد، اتصال یا کوپلینگ گاردان است. اتصالات گاردان مزایای ویژه‌ای نسبت به دیگر اتصالات و کوپلینگ‌ها دارد که به آن‌ها پرداخته خواهد شد. علاوه بر این، در بسیاری از ماشین‌ها، تجهیزات و سیستم‌های صنعتی از جمله انواع وسایل نقلیه، ربات‌ها و ... به‌طور گسترده از این اتصال استفاده می‌شود.

در کتاب حاضر با توجه به اهمیت و ضرورت موضوع، از ابعاد مختلف پیرامون اتصالات گاردان توضیح داده می‌شود. ابتدا انواع کوپلینگ‌ها و اتصالات معرفی می‌شوند و دربارهٔ کاربرد، ویژگی‌ها، مزایا و معایب هر یک شرح داده می‌شود. همچنین به انواع روش‌های انتقال قدرت مرسوم در سیستم‌های مکانیکی به‌ویژه سیستم محور (شفت و کوپلینگ) که اتصال گاردان در آن نقش به‌سزایی دارد، پرداخته می‌شود. از دیگر ویژگی‌های این کتاب، ارائهٔ شکل‌ها و مثال‌های متعدد و گوناگون است که برای فهم بهتر خوانندگان بسیار مفید است. همچنین در پایان هر فصل، تمریناتی آورده شده است که به تثبیت مطالب کمک شایانی می‌کند و راه را برای افراد علاقه‌مند به تحقیق در این زمینه باز می‌کند.

پس از تبیین جایگاه بحث و مزایای گوناگون اتصالات گاردان نسبت به دیگر کوپلینگ‌ها، به بررسی سیر تکاملی این اتصال، انواع و کاربردهای آن به‌صورت تفصیلی پرداخته می‌شود. بدین ترتیب، علت استفادهٔ گسترده از این اتصال پس از گذشت حدود سیصد سال که از طراحی اولیهٔ آن گذشته است، روشن می‌شود. همچنین اجزای مختلف، دسته‌بندی‌های موجود، پارامترهای طراحی، عوامل مؤثر بر رفتار و ابداعاتی که در زمینهٔ اتصالات گاردان یونیورسال انجام شده است، شرح داده می‌شوند.

سپس با بیان روابط حاکم بر رفتار اتصالات گاردان به مدل‌سازی ریاضی آن پرداخته می‌شود تا بتوان پاسخ خروجی آن را محاسبه کرد و تحریکات یا نوساناتی را که به‌واسطهٔ آن در سیستم به‌وجود می‌آید، تحلیل نمود. علاوه بر این، تعیین زوایای کاری بهینه و میزان بازدهی این اتصال در شرایط مختلف از جمله مواردی هستند که در کتاب پیش رو بررسی می‌شوند.

اتصالات گاردان بیشترین کاربرد را در سیستم‌های مختلف انواع خودروها اعم از جاده‌ای، ریلی، دریایی و هوایی دارد. از سال‌ها پیش، اتصال فوق در سیستم پیش‌رانش (محرکه)، سیستم فرمان (هدایت) و ... وسایل نقلیهٔ گوناگون به‌طور گسترده استفاده می‌شد. در اینجا نیز کاربرد این اتصال در صنایع اتومبیل‌سازی و به‌ویژه سیستم انتقال قدرت تشریح می‌شود.

از سوی دیگر، یکی دیگر از کاربردهای متداول اتصالات گاردان یونیورسال در زمینهٔ رباتیک است. در ربات‌های مختلف، این اتصال با اتصالات مکانیکی دیگر ترکیب می‌شود و امکان حرکات انتقالی و دورانی گوناگون را برای انواع ربات‌های صنعتی، انسان‌نما، توانبخشی و ... فراهم می‌کند. در این کتاب به استخراج روابط حاکم بر چیدمان‌های مختلف از ترکیب اتصال گاردان با دیگر اتصالات رایج پرداخته می‌شود.

در نهایت، مدل‌سازی نرم‌افزاری اتصال گاردان در نرم‌افزارهای متلب (محیط سیم‌مکانیک) و ادمز توضیح داده می‌شود. نرم‌افزارهای مذکور در فضای صنعت و دانشگاه کاملاً شناخته شده‌اند و به‌طور مکرر از آن‌ها استفاده می‌شود. حُسن این دو نرم‌افزار علاوه بر رایج بودن آن‌ها این است که کوپلینگ گاردان یونیورسال را به‌صورت یک مجموعهٔ واحد ارائه داده‌اند و می‌توان به‌طور مستقیم از این اتصال در شبیه‌سازی سیستم‌های مختلف استفاده کرد. همچنین توانایی‌های دیگری در مدل‌سازی اتصال فوق دارند که با مطالعهٔ مطالب این کتاب می‌توان به آن‌ها اشراف پیدا کرد.

در پایان لازم به ذکر است که امروزه مکانیزم‌های متعددی برای اتصال محورهای دوار مختلف (محورهای غیر هم‌صفحه، موازی و ...) طراحی شده است و بسیاری از مدل‌های پیشین نیز برای افزایش کاربری توسعه و تعمیم داده شده‌اند و هنوز این روند ادامه دارد. در کتاب حاضر، تنها استفاده از رایج‌ترین نوع اتصال گاردان یونیورسال مورد نظر بوده است و مواردی چون تحلیل مفصل کارکرده یا معیوب، طراحی مکانیزم‌های مشابه و یا توسعهٔ اتصالات پیشین خارج از چارچوب کاری است و به آن‌ها پرداخته نشده است.